

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE**

**DISTART**

*Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque,  
del Rilevamento, del Territorio*

**TESI DI LAUREA**

**In**

**Progetti di Strutture LS**

**SPERIMENTAZIONE E MODELLAZIONE DI UN NODO A TRE  
VIE APPARTENENTE AD UN SISTEMA PREFABBRICATO  
IN CEMENTO ARMATO**

**CANDIDATO**

**Alessandro La Grotta**

Matricola n° 0000289379

**RELATORE**

Chiar.mo Prof. Ing. **Marco Savoia**

**CORRELATORE**

Prof. Ing. **Claudio Mazzotti**

Anno Accademico 2009/2010

Sessione II

---





# Indice

---

## Capitolo 1

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>-1-</b>
---------------------	------------

## Capitolo 2

<b>DESCRIZIONE E REALIZZAZIONE DEL NODO STRUTTURALE</b>	<b>-6-</b>
2.1 Caratteristiche generali del sistema costruttivo	-6-
2.2 Caratteristiche del nodo strutturale	-12-
2.3 Getto di prefabbricazione	-19-
2.4 Getto di completamento	-24-

## Capitolo 3

<b>DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA DI CONTRASTO</b>	<b>-34-</b>
3.1 Telai di controvento	-34-
3.2 Tipologia di vincolamento all'estremità del nodo	-39-
3.3 Fasi di collegamento del nodo ai vincoli	-47-

## Capitolo 4

<b>STRUMENTAZIONE</b>	<b>-51-</b>
4.1 Estensimetri	-51-
4.2 LVDT	-62-
4.3 Cella di carico	-67-
4.4 Filo estensibile	-69-
4.5 Martinetti cavi	-70-
4.6 Centralina P3 – Vishay	-72-
4.7 Pistone di spinta	-73-

## **Capitolo 5**

### **APPLICAZIONE DEGLI ESTENSIMETRI -75-**

5.1 Estensimetri nel getto di prefabbricazione -75-

5.2 Estensimetri nel getto di completamento -79-

## **Capitolo 6**

### **APPLICAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DI SUPERFICIE -86-**

6.1 Generalità -86-

6.2 Posizionamento degli LVDT per misurare spostamenti relativi -89-

6.3 Applicazione degli strumenti a riferimento assoluto -97-

## **Capitolo 7**

### **SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI -101-**

7.1 Generalità -101-

7.2 Apparecchiature di acquisizione dei segnali -103-

7.3 Software di acquisizione dati -111-

## **Capitolo 8**

### **MODALITA' ESECUTIVE DI PROVA -115-**

8.1 Generalità -115-

8.2 Valori teorici delle sollecitazioni di progetto -116-

8.3 Definizione dei livelli di carico -121-

## **Capitolo 9**

### **ELABORAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI -127-**

9.1 Generalità -127-

9.2 Grafici relativi al comportamento globale -129-

9.2.1 Confronto dei grafici relativi al comportamento globale -139-

9.3 Analisi globale del comportamento strutturale	-141-
9.3.1 Variazione delle resistenze	-144-
9.3.2 Variazione delle rigidezze secanti	-146-
9.3.3 Energia dissipata	-150-
9.4 Analisi locale del comportamento strutturale	-154-
9.4.1 Pannello di nodo	-155-
9.4.2 Barre longitudinali di nodo	-162-
9.4.3 Interfaccia nodo-pilastro	-167-
9.4.4 Interfaccia nodo-trave	-172-
9.4.5 Interfaccia nodo-ancoraggi barre integrative	-195-
9.5.6 Interazione nodo-mensola	-200-

## **Capitolo 10**

<b>MODELLAZIONE DEL NODO STRUTTURALE</b>	<b>-209-</b>
10.1 Descrizione del modello agli elementi finiti	-209-
10.1.1 Interfaccia trave-mensola	-216-
10.1.2 Interfaccia acciaio-calcestruzzo	-218-
10.2 Analisi dei risultati	-222-
10.2.1 Diagrammi forza-spostamento	-222-
10.2.2 Andamento delle tensioni	-225-
10.2.3 Andamento degli scorrimenti e delle deformazioni	-227-

<b><i>Bibliografia</i></b>	<b>-232-</b>
----------------------------	--------------

# Capitolo 1

## INTRODUZIONE

La prefabbricazione di strutture in cemento armato è il sistema costruttivo che utilizza elementi in cemento armato normale o precompresso, eseguiti a piè d'opera o in appositi stabilimenti con procedimenti industrializzati, assemblati in opera mediante unioni strutturali di vario tipo. Le costruzioni prefabbricate hanno oggi un larga diffusione, in particolar modo per determinate tipologie di edifici, quali quelli industriali (l'80% di tali edifici è oggi realizzato con struttura prefabbricata) e, in maniera sempre crescente, quelli commerciali ad uno o più piani. Il largo impiego di tale sistema costruttivo è un fattore che giustifica la rilevanza economica di una ricerca in tale settore, alla quale si affianca sicuramente una grande rilevanza sociale, riguardante la salvaguardia di vite umane in occasione di eventi sismici. Proprio da queste considerazioni deriva il forte interesse per il raggiungimento di una esaustiva e razionale soluzione ai problemi inerenti la progettazione sismica degli edifici prefabbricati. Molti aspetti relativi a tale problema sono stati già indagati con ricerche su scala nazionale ed europea; in particolare è stata messa a punto con indagini teorico-sperimentali l'analisi dell'insieme strutturale, la valutazione delle sue risorse duttili e della conseguente capacità dissipativa sotto azione sismica e il corretto calcolo dei principali elementi.

Fino ad una decina di anni fa, il dimensionamento e le verifiche in campo elasto-plastico degli elementi e dei particolari utilizzati nella prefabbricazione consideravano i carichi e sovraccarichi verticali come azione di riferimento; nelle zone dichiarate sismiche, le sollecitazioni provocate dalle azioni orizzontali di progetto venivano utilizzate al più per analisi delle resistenze in campo elastico. L'introduzione dell'ordinanza n° 3274 del 20 marzo 2003 (primo passo verso il recepimento delle direttive europee in materia) ha posto l'accento anche e soprattutto sulla resistenza, sulle risorse di duttilità, e quindi sulle capacità dissipative delle strutture prefabbricate soggette all'azione orizzontale rappresentativa di un evento sismico.

Resta invece da effettuare un'indagine approfondita e generalizzata sullo studio dei collegamenti tra elementi prefabbricati di strutture soggette a sisma, che sia in grado di condurre ad una serie di indicazioni progettuali e realizzative, scientificamente corrette,

complete e sperimentalmente testate, dei nodi e delle unioni nelle strutture prefabbricate.

Uno dei criteri progettuali innovativi introdotti dalle recenti normative è il *principio della gerarchia delle resistenze*, finalizzato a garantire l'innesco dei meccanismi duttili, responsabili della dissipazione energetica, e la prevenzione dei meccanismi fragili, che possono prematuramente compromettere l'integrità strutturale durante l'azione sismica; la sua applicazione pratica, supposta la corretta progettazione di pilastri, travi e solai, dipende dal corretto funzionamento delle connessioni e dal loro efficace posizionamento.

Occorre pertanto sviluppare e validare modelli teorici, basati su approcci meccanici, del comportamento dei collegamenti di strutture sottoposte ad azioni orizzontali; vale a dire ricavare le curve forza-spostamento e/o momento-rotazione sia per carichi monotoni che ciclici.

Nell'ottica delle problematiche appena discusse, la presente tesi, di carattere sperimentale, si prefigge l'obiettivo di descrivere la preparazione e l'esecuzione della prova di carico ciclico effettuata su un nodo strutturale a 3 vie utilizzato in sistemi di prefabbricazione pluriplano e di analizzarne i risultati. Lo scopo di questo studio è quello di rilevare, al crescere del livello di carico e quindi dello stato di sollecitazione, misurazioni puntuali dello stato deformativo della struttura mediante strumenti a comportamento resistivo, induttivo e meccanico in parte affogati nei getti (sia di prefabbricazione che di completamento) ed in parte fissati, mediante varie modalità, sulla superficie della struttura.

Questa prova segue cronologicamente altri test svolti con le stesse modalità su altri elementi che compongono il sistema costruttivo in c.a. prefabbricato a completamento in opera, come, ad esempio: prove del sistema di ancoraggio dei pilastri alla fondazione; prove di resistenza di pilastri privi del pannello di nodo, di un nodo a 4 vie (interno) e di un nodo a 3 vie analogo a quello in questione (svolta il 9-12-2009), ma con armatura e sistema d'ancoraggio differente, la cui sperimentazione ha permesso di elaborare nuove soluzioni più efficaci, riguardanti soprattutto l'ancoraggio delle barre d'acciaio, e di produrre la configurazione d'angolo in esame.

Ad eccezione della strumentazione delle gabbie d'armatura degli elementi prefabbricati, eseguita presso gli stabilimenti della ditta APE (sita in via Leonardo da Vinci, 14 Montecchio Emilia (RE)), committente dell'indagine sperimentale, tale prova è stata

interamente preparata e condotta presso il Laboratorio di Prove su Strutture (La.P.S.) dell'Università di Bologna.

La prova in esame (denominata anche II prova) è stata eseguita presso il La.P.S. in data 27/07/2010.

Nella prima parte del presente documento verrà descritto il nodo strutturale rappresentandone geometrie ed armature di progetto; si passerà quindi a rappresentare il telaio di contrasto e le strutture di vincolamento del nodo di prova. Verrà quindi descritta la strumentazione utilizzata nel rilevamento dei dati sperimentali, nonché le modalità con le quali tale strumentazione verrà applicata alla struttura in esame; si rappresenteranno contemporaneamente le fasi di assemblaggio degli elementi prefabbricati componenti il nodo strutturale, eseguite simulando fedelmente le modalità effettivamente adottate nelle realizzazioni delle strutture prefabbricate multipiano reali.

Nella seconda parte verranno invece descritte le modalità esecutive della prova, illustrando il sistema di acquisizione dati utilizzato, il protocollo di cicli di carico applicati ed il tipo di elaborazioni eseguite sui dati rilevati. Verrà quindi effettuata una approfondita analisi dei risultati elaborati, finalizzata a descrivere il comportamento strutturale, sia locale che globale, della struttura di collegamento oggetto di prova. Si forniranno inoltre dei confronti con i risultati più significativi ottenuti nella prova realizzata in data 09/12/2009 (denominata anche I prova).

La terza parte include una modellazione agli elementi finiti svolta sul collegamento strutturale con l'obiettivo principale di simulare il meccanismo di aderenza acciaio-calcestruzzo alla base dell'apertura delle fessure.

Di seguito vengono presentate le tematiche trattate nei diversi capitoli di cui si compone la tesi:

- *Capitolo 2*

Descrizione e realizzazione del nodo strutturale

Viene presentato il sistema costruttivo di cui fa parte il nodo oggetto di prova. Vengono inoltre descritte le caratteristiche geometriche della struttura, evidenziandone in particolare le differenze rispetto al precedente test svolto su un nodo a tre vie. Infine sono riportate le varie operazioni necessarie per la realizzazione della struttura sia nella fase di prefabbricazione che in quella di completamento in opera.

- *Capitolo 3*

Descrizione della struttura di contrasto

Vengono descritte le strutture in acciaio necessarie a vincolare al solaio le estremità libere del nodo e le fasi di esecuzione del vincolamento. Vengono inoltre presentati i dispositivi di applicazione dei carichi di prova.

- *Capitolo 4*

Strumentazione

In questo capitolo sono presentati gli strumenti applicati alla struttura e utilizzati durante la sperimentazione per monitorare spostamenti e deformazioni (estensimetri, LVDT, filo estensibile, cella di carico) e per realizzare le sollecitazioni di prova (martinetti ad olio, pistone di spinta).

- *Capitolo 5*

Applicazione degli estensimetri

Vengono chiarite le caratteristiche e il corretto posizionamento degli estensimetri posti sulle barre di armatura e annegati nei due getti consecutivi di calcestruzzo.

- *Capitolo 6*

Applicazione della strumentazione di superficie

Vengono precisate le caratteristiche e la collocazione degli strumenti posti a contatto con la superficie del nodo necessari per misurare spostamenti relativi e assoluti in continuo con la variazione del carico (LVDT, filo estensibile).

- *Capitolo 7*

Sistema di acquisizione dati

Vengono descritte tutte le apparecchiature dedicate all'acquisizione e alla gestione dei segnali provenienti dagli strumenti, che vengono rilevati, convertiti in una misura fisicamente significativa e registrati in un file dati di output.

- *Capitolo 8*

Modalità esecutive di prova

Vengono descritte le modalità di svolgimento della prova, elencando i valori limite adottati durante le serie cicliche di carico. Sono inoltre introdotte le caratteristiche dei materiali utilizzati e i valori teorici delle sollecitazioni resistenti.



- *Capitolo 9*

Elaborazione ed analisi dei risultati

Costituisce la parte fondamentale dell'indagine sperimentale svolta, trattando la descrizione e l'argomentazione dei risultati forniti dalla prova ciclica sul collegamento strutturale in esame. Vengono illustrate le elaborazioni numeriche svolte al fine di produrre i diagrammi forza-spostamento e momento-curvatura utili a fare un confronto tra la prova in esame e quella operata nell'inverno 2009. Viene inoltre operata una analisi locale del comportamento strutturale, grazie all'accurata analisi di tutti gli strumenti presenti nel collegamento.

- *Capitolo 10*

Modellazione del nodo strutturale

Viene descritta la modellazione agli elementi finiti svolta sul collegamento strutturale e un'analisi dei risultati ottenuti.

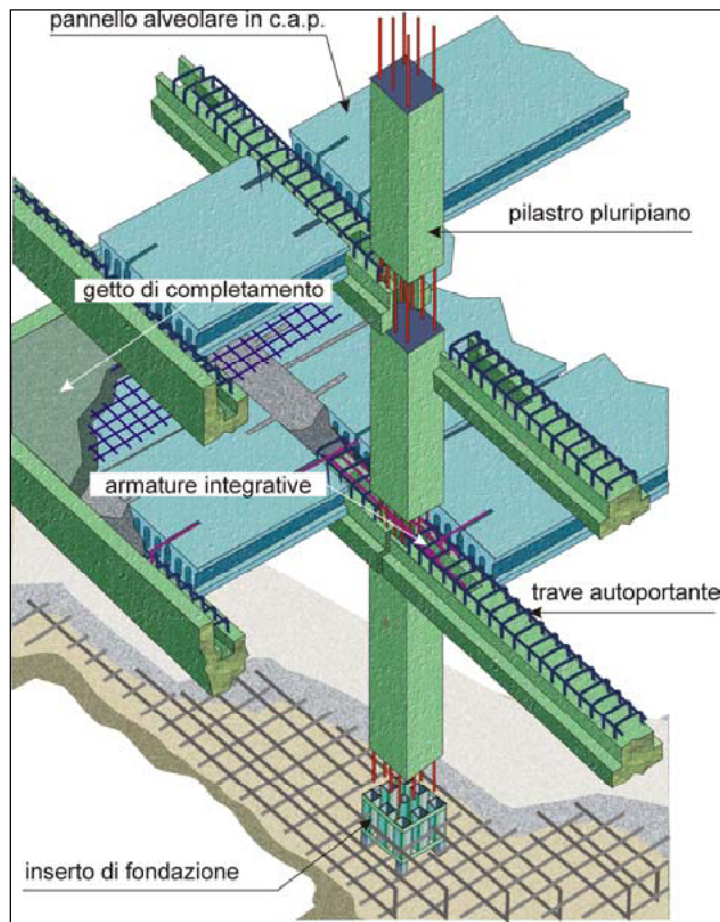
## **Capitolo 2**

### **DESCRIZIONE E REALIZZAZIONE DEL NODO STRUTTURALE**

In questo capitolo viene descritta la struttura oggetto di prova, particolare strutturale di collegamento d'angolo tra gli elementi costituenti l'intelaiatura portante in opere prefabbricate. Si descrive, in primo luogo, il sistema costruttivo tipico a cui la struttura di prova fa riferimento; si passa quindi a descrivere la geometria del nodo nella sua configurazione di prova, soffermandosi in particolar modo sulla descrizione delle armature integrative, applicate in opera, e di preconfezionamento, inglobate nel getto prefabbricato svolto in stabilimento.

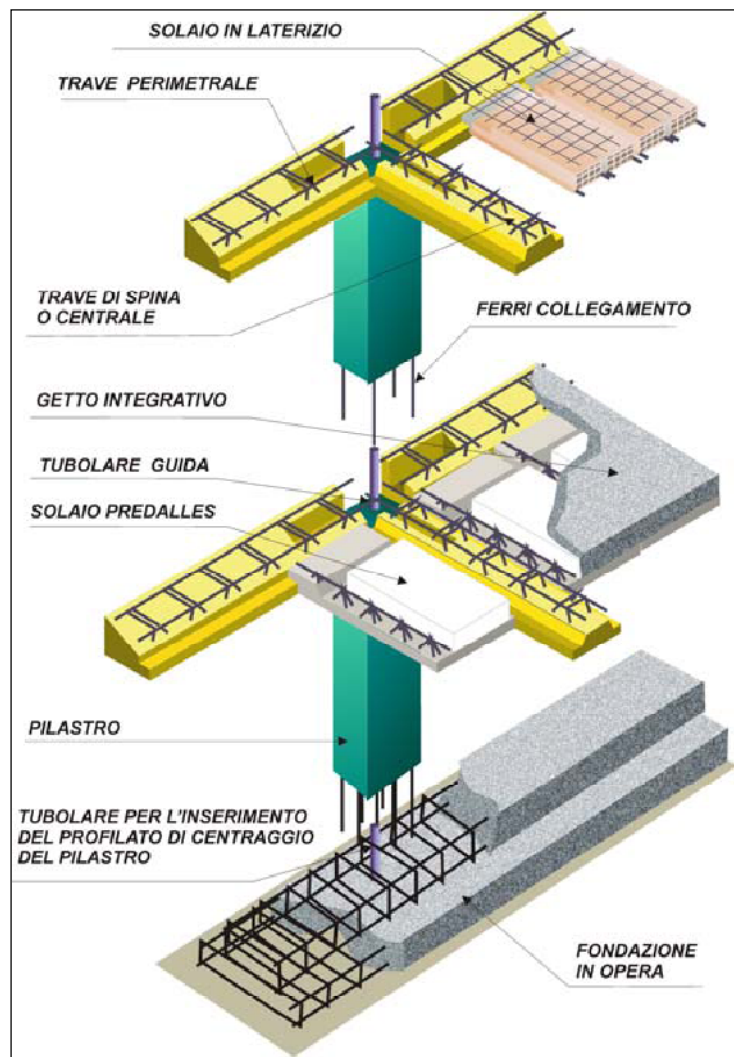
#### **2.1 - Caratteristiche generali del sistema costruttivo**

Il nodo a tre vie oggetto d'indagine è un particolare strutturale appartenente allo schema costruttivo di prefabbricazione in cemento armato normale utilizzato dalla ditta APE s.p.a. di Montecchio (RE), denominato "SISTEMA COSTRUTTIVO INTEGRATO PLURIPIANO" (fig. 2.1), che rappresenta nel settore dell'edilizia terziaria - industriale un'alternativa alla prefabbricazione in C.A.P..



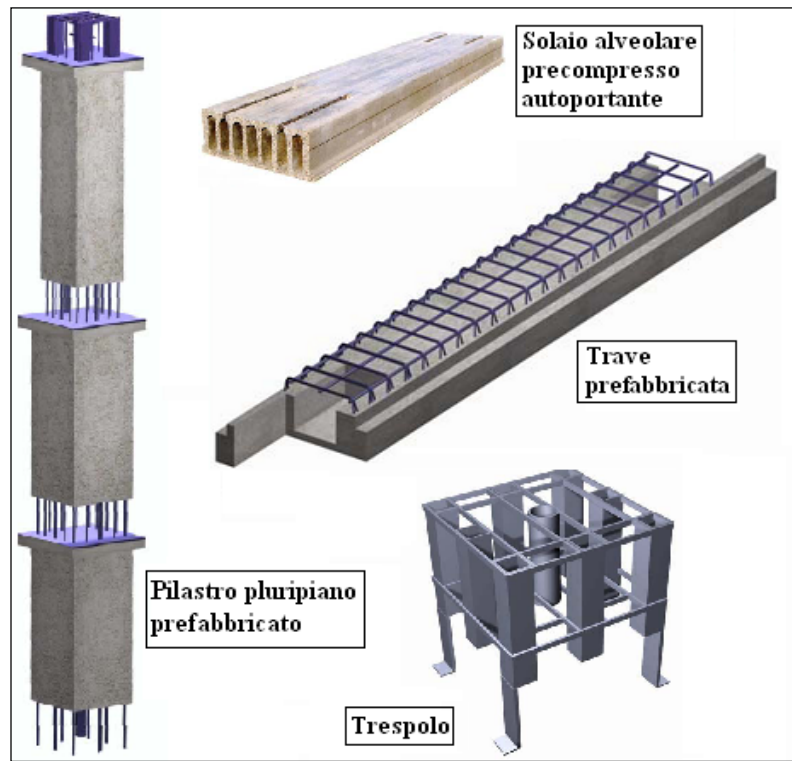
- **Figura 2.1** - Schematizzazione del “SISTEMA COSTRUTTIVO INTEGRATO PLURIPIANO”.

Il sistema di prefabbricazione classico ricorre ad elementi precompressi interamente realizzati in stabilimento ed assemblati quasi esclusivamente a secco in schemi a funzionamento isostatico; si distingue quindi per le elevate capacità prestazionali dei singoli componenti, garantendo notevoli resistenze ai sovraccarichi verticali con ampie luci di carico, ma risente spesso delle problematiche connesse: alla progettazione, per sollecitazioni indotte dalle azioni orizzontali sismiche, delle connessioni di nodo; alla scelta del tipo di fondazione; alla caratterizzazione delle finiture. Introdotto nell'intento di ovviare a tali limitazioni, il “SISTEMA COSTRUTTIVO INTEGRATO” viene sviluppato come evoluzione nel settore dell'edilizia terziaria-industriale del procedimento costruttivo antecedente “K AVANZATO” (fig. 2.2), nato con l'obiettivo di realizzare strutture ad uso civile residenziale sfruttando l'assemblaggio in opera di semiprefabbricati leggeri.



- Figura 2.2 - Schematizzazione del "SISTEMA K AVANZATO".

L'obiettivo è quello di realizzare una struttura pluripiano iperstatica tradizionale dotata di "nodo di tipo umido", caratterizzata da un montaggio "tutto a secco" e da una organizzazione di cantiere tipica dei prefabbricati industriali. Si progettano quindi elementi costruttivi semiprefabbricati speciali: pilastri pluripiano con interruzioni del getto; travi tralicciate di ampia luce dotate di tasche di completamento ed ali di supporto per gli orizzontamenti, pannelli alveolari precompressi autoportanti dotati di armature d'innesto o asole di alloggiamento per armature di completamento, che consentano di sfruttare a pieno i vantaggi offerti dalla prefabbricazione mediante il trasporto in cantiere ed il sollevamento in sede (figg. 2.3 e 2.4).



- **Figura 2.3** - Elementi prefabbricati costituenti il sistema costruttivo integrato.



- **Figura 2.4** - Montaggio delle travi prefabbricate e particolare delle asole di alloggiamento per le armature integrative.

L'assemblaggio in schemi isostatici fedeli alla disposizione definitiva ed in grado di supportare il peso proprio ed il peso dei getti integrativi, fa sì che le uniche attività di getto in opera richieste siano:

- l'esecuzione della struttura di fondazione (platea, trave rovescia o a sacco, plinti), nella quale sono annegati i "TRESPOLI" (fig. 2.3), dispositivi con lo scopo di sostenere il pilastro al montaggio e di consentirne l'inghisaggio con la fondazione stessa;

- esecuzione del getto di seconda fase della fondazione mediante malte antiritiro, grazie al quale il pilastro, montato negli appositi tubolari del trespolo, centrato e piombato, viene reso solidale all'inserito di fondazione;
- disposizione delle armature integrative, fornite a corredo, di nodi strutturali e solai;
- bagnatura delle superfici ed esecuzione, in un'unica fase, del getto di completamento.

L'avvenuta maturazione dei getti integrativi conferisce al sistema la capacità portante di un sistema strutturale spaziale iperstatico.

L'area di applicazione di tale sistema costruttivo è, come detto, quella del terziario-industriale: centri commerciali, direzionali, alberghi, centri artigianali, parcheggi interrati e fuori terra, ecc; con tipologie strutturali variabili dalla piccola struttura fino a maglie di 10x10m e oltre, eventualmente caratterizzate da elevati sovraccarichi. L'altezza varia di norma da uno a quattro piani utilizzando il pilastro pluripiano unico, ma la possibilità di combinare la tecnologia di innesto in fondazione (trespolo) anche alla sommità del pilastro consente di eseguire edifici di altezze superiori, limitatamente alle possibilità dei mezzi di sollevamento (fig. 2.5). Inoltre l'utilizzo dell'innesto a "trespolo" anche in elevazione può consentire la realizzazione di sistemi di prefabbricazione multipli, frutto dell'integrazione del SISTEMA COSTRUTTIVO INTEGRATO con il SISTEMA K, che ampliano notevolmente la gamma di interventi realizzabili; ne è un esempio l'edificio di sette piani realizzato dalla ditta APE a Bardonecchia, in occasione dei 'XX Giochi Olimpici Invernali - Torino 2006', con destinazione a parcheggi, commerciale, sanitaria, per i tre piani inferiori in SISTEMA PLURIPIANO INTEGRATO, ed alberghiera, per i restanti quattro piani superiori in SISTEMA K (vedi fig. 2.6).





- **Figura 2.5** - Edificio pluriplano realizzato con innesti a trespolo in sommità dei pilastri.



- **Figura 2.6** - Particolare dell'assemblaggio del tripiano a destinazione terziario-industriale con vista sui piani a destinazione alberghiera completati sullo sfondo.

## 2.2 - Caratteristiche del nodo strutturale

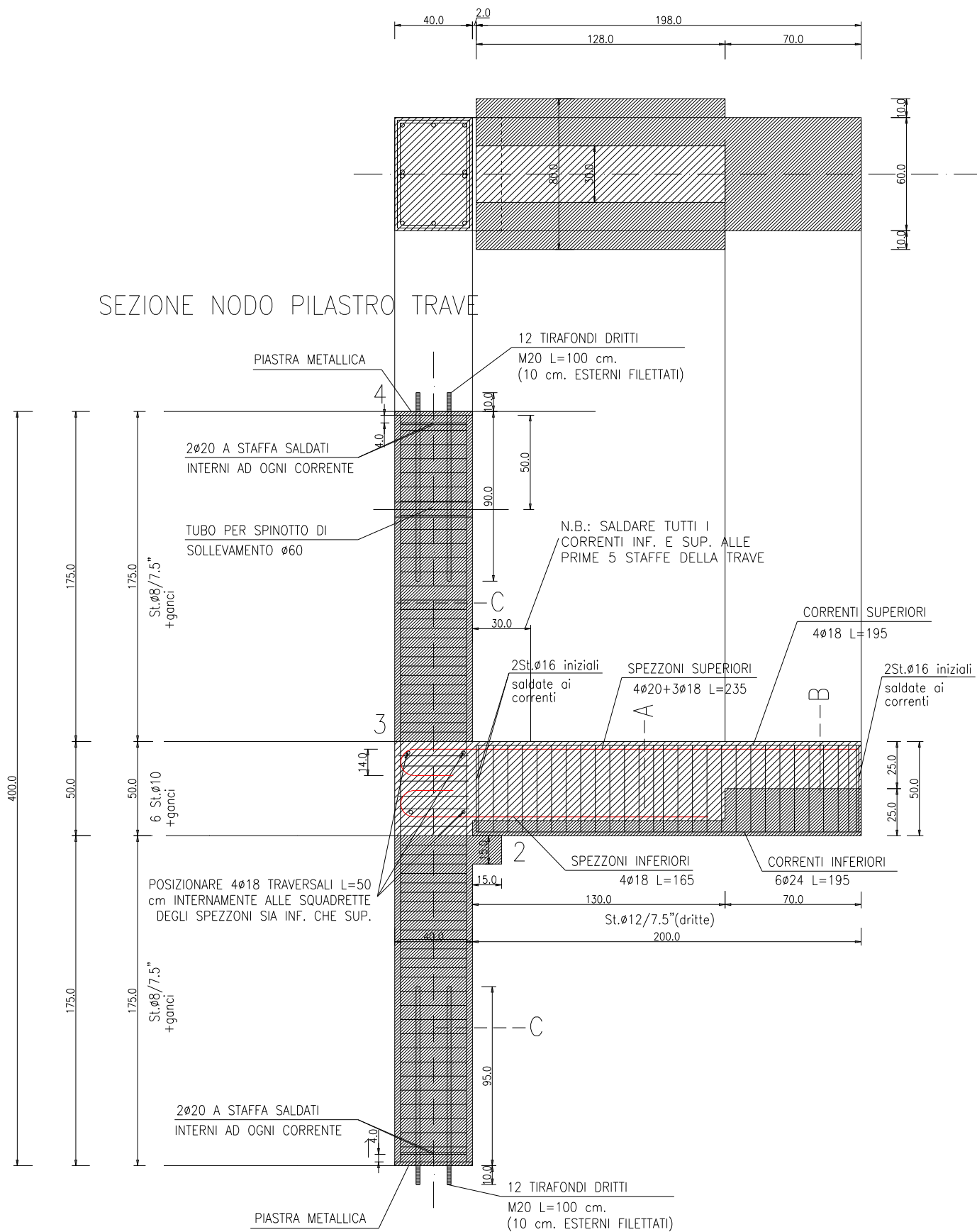
L'elemento strutturale sottoposto a prova di carico ciclica è costituito da un pilastro a sezione rettangolare ( $l = 40$  cm,  $b' = 60$  cm) di 4 m di altezza e da una porzione di trave di 2 m di lunghezza, avente sezione a T rovescia ( $h = 50$  cm,  $b = 60$  cm,  $B = 80$  cm,  $h' = 25$  cm). L'innesto della trave, realizzato in corrispondenza della sezione di metà altezza del pilastro, viene a costituire il nodo vero e proprio ( $h = 50$  cm,  $l = 40$  cm,  $b' = 60$  cm). Sul lato più largo del pilastro, in corrispondenza dell'estremità inferiore dell'interruzione di nodo, è realizzata una mensola di sezione trasversale 15 x 15 cm atta a fornire l'appoggio provvisorio delle travi prefabbricate in fase di assemblaggio a secco. Tutte le dimensioni elencate sono riscontrabili nelle rappresentazioni grafiche riportate nelle figure 2.7 e 2.8.

Poiché l'interasse lordo di interpiano generalmente adottato per tali intelaiature è di 4 m, la scelta delle lunghezze delle due porzioni di pilastro considerate deriva dall'ideale separazione del nodo strutturale mediante sezionamento di due pilastri esterni consecutivi in corrispondenza della corrispettive sezioni di mezzeria. L'annullamento, in corrispondenza di tali sezioni, delle sollecitazioni flessionali prodotte da eventuali azioni orizzontali agenti sull'opera, convalida la scelta dello schema a cerniera cilindrica adottato in prova per il vincolo delle sezioni di estremità del pilastro prefabbricato, garantendo la fedele riproduzione in laboratorio delle sollecitazioni presenti nelle reali condizioni di esercizio.

Anche le dimensioni delle sezioni trasversali sono rappresentative di quelle generalmente adottate per le porzioni perimetrali delle strutture intelaiate realizzate in pratica; la trave prefabbricata, in particolar modo, presenta una doppia ala inferiore di 10 cm di larghezza e 25 cm di altezza, che funge d'appoggio per i pannelli di solaio in fase di assemblaggio a secco, ed una tasca 27 x 30 x 130 cm di lunghezza, destinata invece ad ospitare gli spezzoni di armatura ed il getto di completamento per la realizzazione in opera del nodo di collegamento. Nella porzione di trave prefabbricata adottata nell'allestimento della prova di laboratorio le ali inferiori della trave sono presenti solo nei primi 130 cm di lunghezza, garantendone così sia la partecipazione alla diffusione dei carichi nelle sezioni d'interesse sperimentale prossime al nodo, sia la possibilità di realizzare all'estremità opposta della trave una più agevole connessione al pistone di spinta.



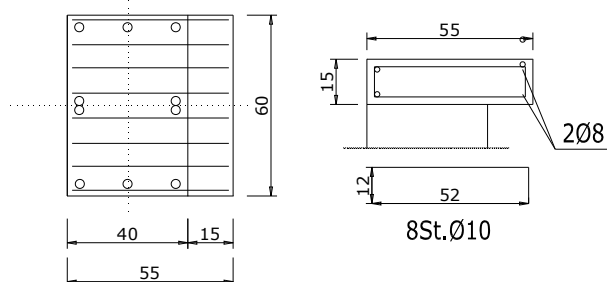
# PIANTA NODO PILASTRO TRAVE



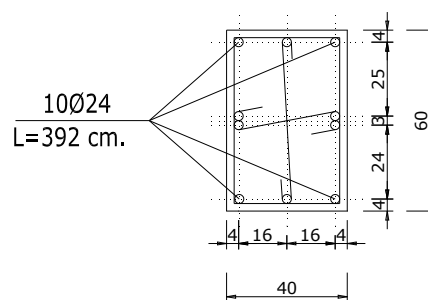
- Figura 2.7 – Caratteristiche geometriche e dettagli costruttivi nodo a tre vie

## SEZIONI PILASTRO

## ARMATURA CAPITELLO

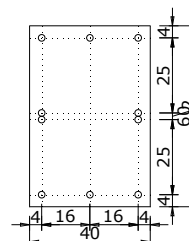


## SEZ. C-C



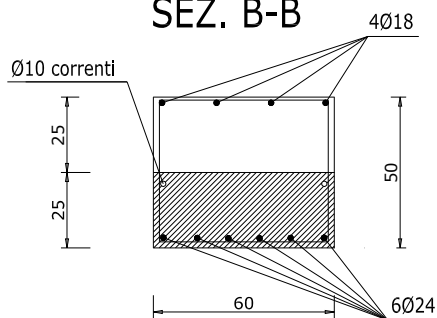
## PIASTRA METALLICA POSIZIONE 3

N.1 PEZZO

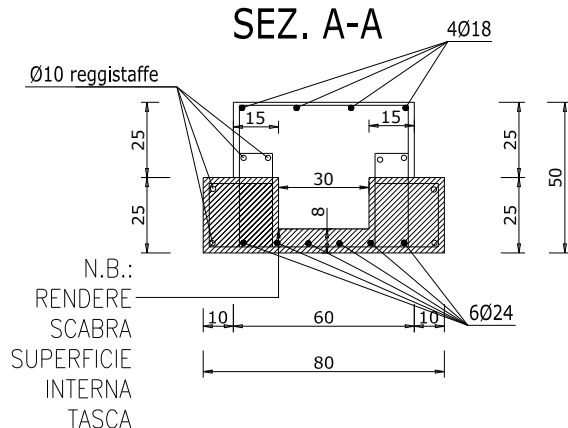


## SEZIONI TRAVE

### SEZ. B-B

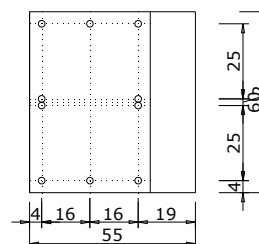


### SEZ. A-A

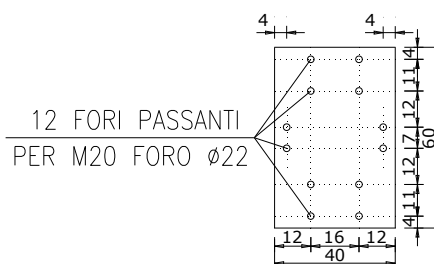


## PIASTRA METALLICA POSIZIONE 2

N.1 PEZZO



## PIASTRA METALLICA POSIZIONE 1-4



SPESS. 20 mm. – N.2 PEZZI

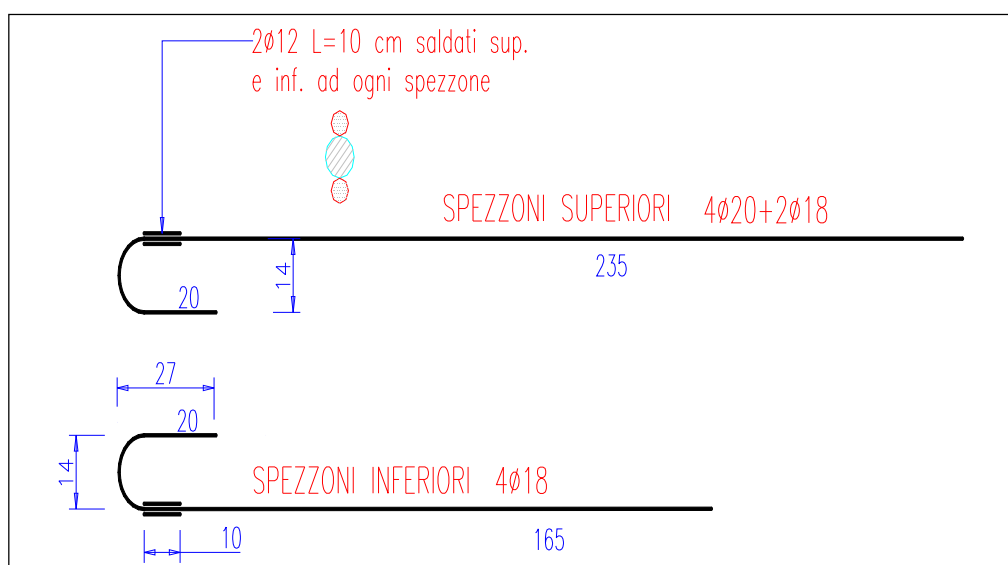
- Figura 2.8 – Particolari costruttivi nodo a tre vie

Le armature del nodo strutturale possono essere suddivise in armature di prefabbricazione e spezzoni di completamento. Il pilastro è interamente armato in fase di prefabbricazione mediante 10 barre  $\Phi 24$  longitudinali collegate trasversalmente mediante staffe doppie e ganci  $\Phi 8$  posti ad interasse di 7,5 cm (vedi sezione C-C' in figg. 2.7 e 2.8); per motivi di praticità anche le armature trasversali previste nel successivo completamento del nodo vengono disposte nella gabbia del pilastro già all'atto della prefabbricazione.

L'estremità della trave che compone il nodo prevede invece la predisposizione di due differenti strati di barre longitudinali di intradosso: 6 barre  $\Phi 24$  vengono inglobate all'atto della prefabbricazione nella soletta inferiore della tasca di completamento, garantendo almeno 4,5 cm di copriferro computati sull'asse della barra ; 4 spezzoni di completamento  $\Phi 18$ , di 165 cm di lunghezza ciascuno, vengono disposti in appoggio sulla soletta della tasca prefabbricata, determinando quindi un copriferro di circa 9 cm sull'asse della barra. L'armatura longitudinale d'estradosso viene invece disposta su un unico strato, protetto sempre da un copriferro di almeno 4,5 cm, ma in momenti differenti: 4 barre  $\Phi 18$  vengono fissate alla gabbia d'armatura già in stabilimento, pur non venendo inglobate nel getto di prefabbricazione; 4 spezzoni di completamento  $\Phi 20$  più 2 spezzoni di completamento  $\Phi 18$  , di 235 cm di lunghezza ciascuno, vengono disposti nei restanti interassi all'atto dell'assemblaggio del nodo in laboratorio. L'armatura a taglio è costituita da staffe  $\Phi 12$  diritte poste a 7,5 cm d'interasse, affiancate su ambo i lati della trave da una coppia di staffe  $\Phi 10$ , disposte ad interasse di 15 cm, che fungono anche d'armatura flessionale per le ali inferiori della trave; 8 barre reggistaffe  $\Phi 10$  completano la gabbia d'armatura (vedi sez. A-A' B-B' in figg. 2.7 e 2.8). nelle immagini di figura 2.12 e 2.13 è possibile vedere alcuni particolari delle armature di pilastro e trave.

Risulta importante osservare che la struttura appena descritta è stata costruita con le modifiche suggerite dall'esito della precedente prova svolta su un nodo analogo il 9-12-2009. Le principali differenze tra il nodo in esame e quello analogo testato nell'inverno del 2009:

Le armature integrative utilizzate erano costituite esclusivamente da barre  $\Phi 18$  (7 superiori e 4 inferiori) ripiegate a  $90^\circ$ , nella prova corrente vengono usate barre  $\Phi 20$  (4 superiori) e  $\Phi 18$  (2 superiori e 4 inferiori) ripiegate a  $180^\circ$  con 20 cm di ancoraggio dopo l'uncino. Inoltre, per incrementare ulteriormente l'aderenza al calcestruzzo, sul fianco delle barre uncinate, sono saldati 2 spezzoni di  $\Phi 12$  alla base dell'uncino (vedi fig. 2.9-2.10);

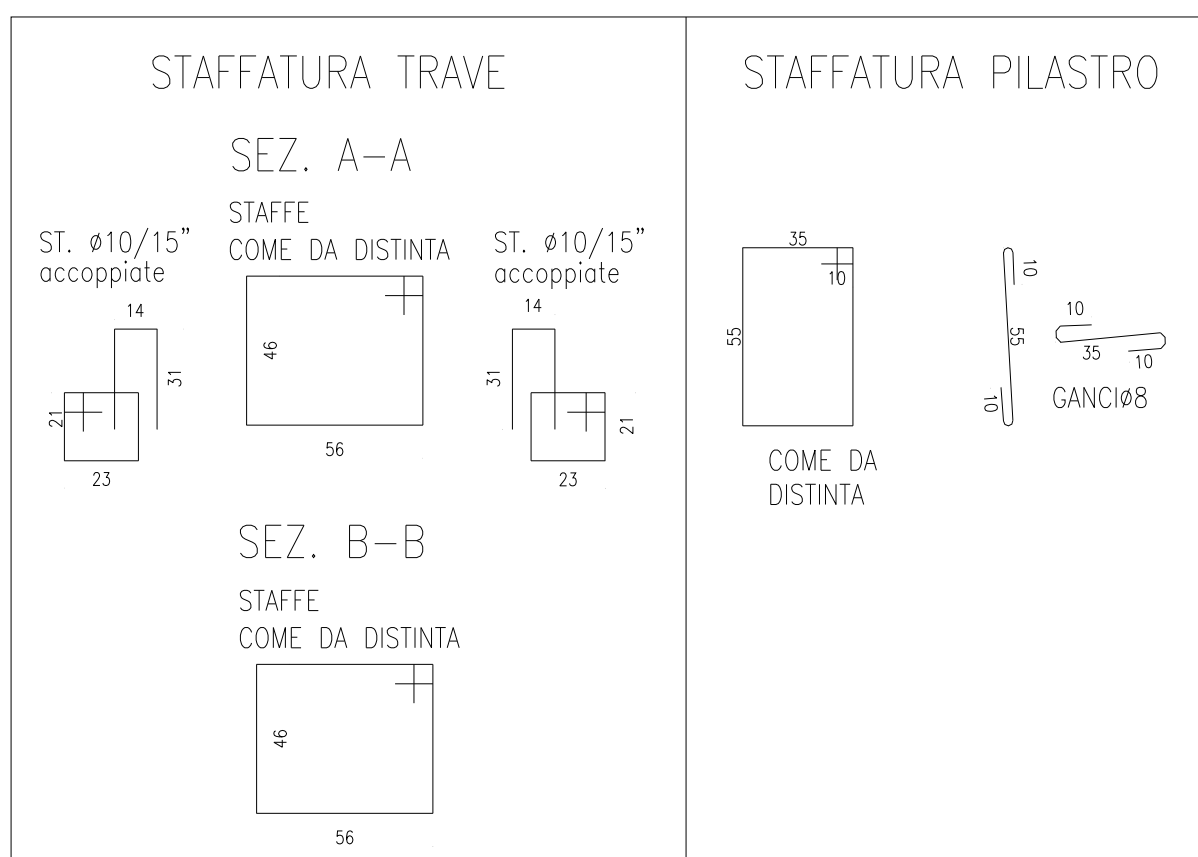


- **Figura 2.9** – Particolari costruttivi delle barre integrative superiori e inferiori con ancoraggio a uncino.



- **Figura 2.10** - Barra integrativa con particolare degli spezzoni di barre  $\Phi 12$  per aumentare l'aderenza.

- Le barre longitudinali del pilastro sono le medesime, ma questa volta le 2 centrali sono accoppiate in corrispondenza dell'asse del pilastro;
- Vengono eliminati i 6 spezzoni  $\Phi 16$  saldati alle barre del corrente inferiore della trave. Infatti in quel punto non si sono registrati particolari problemi di scorrimento delle barre; inoltre la rimozione degli spezzoni ha reso più agevole la posa degli estensimetri;
- Nel pilastro, la staffatura costituita da staffe a 4 braccia e un gancio sul lato lungo, viene sostituita da staffe a 2 braccia e 2 ganci perpendicolari (fig2.11).



- **Figura 2.11** – Particolari costruttivi della staffatura.



- **Figura 2.12** – Particolari armatura trave: **a)**Sezione nodo **b)**Sezione di estremità



- **Figura 2.13** – Particolare armatura pilastro.



## 2.3 – Getto di prefabbricazione

In data 21/6/2010 , dopo aver posizionato gli estensimetri necessari nell'armatura prefabbricata, viene realizzato il getto di prefabbricazione all'interno dello stabilimento della ditta APE s.p.a. a Montecchio (RE).

Il calcestruzzo utilizzato è caratterizzato da  $R_{ck} \geq 500 \frac{kg}{cm^2} = 50 \frac{N}{mm^2}$  .

Per il contenimento del getto, vengono utilizzate casseforme metalliche e, per realizzare l'interruzione del getto in corrispondenza del nodo, ci si serve di piastre metalliche a perdere, forate in corrispondenza delle barre longitudinali passanti (vedi fig. 2.14).



- **Figura 2.14** - Piastre a perdere di contenimento del getto in corrispondenza del nodo.

La tasca prevista nel getto di prefabbricazione nella trave si ottiene mediante l'inserimento di un cassone metallico cavo che, galleggiando sul getto, viene vincolato alla quota desiderata e permette di ottenere una soletta d'intradosso adatta a garantire un idoneo copriferro alle barre d'armatura (vedi figura 2.15a).

La superficie interna della tasca è resa scabra mediante raschiatura del getto non ancora solidificato (fase successiva al getto, una volta tolto il cassone metallico).



- **Figura 2.15** - Getto di prefabbricazione della trave.

- a) Cassone metallico per la realizzazione della tasca;
- b) Livellamento e lisciatura della superficie del getto.



Le principali fasi dell'esecuzione del getto di prefabbricazione hanno riguardato:

- Predisposizione delle casseforme di getto: si tracciano sulla tavola metallica sede di getto gli ingombri degli elementi da gettare, quindi si dispongono apposite casseforme d'acciaio collegate a squadrette metalliche aventi le basi d'aggancio saldate alle tavole di getto; tali squadrette sono munite di un meccanismo ad asole e bietta che consente la corretta disposizione ed il serraggio dei casseri;
- Trattamento mediante olio disarmante delle casseforme ed inserimento delle gabbie d'armatura al loro interno: le gabbie d'armatura, preventivamente strumentate mediante estensimetri vengono collocate all'interno delle casseforme e centrate nel rispetto degli spessori di copriferro. Viene disposta inoltre, all'interno della gabbia d'armatura della trave, la sagoma d'acciaio utile a creare la tasca per il getto di completamento (vedi fig. 2.15a);
- Esecuzione e vibratura del getto di prefabbricazione: il calcestruzzo viene miscelato dalla centrale di betonaggio dello stabilimento e trasportato alla tavola di getto all'interno di un cestello sollevato a mezzo di carro ponte. Posizionato il cestello in corrispondenza delle casseforme si effettua il getto regolando manualmente la quantità di calcestruzzo mediante una saracinesca a tagliola e costipando il getto mediante un vibratore ad immersione (vedi fig. 2.16b e 2.17);
- Prelievo di provini cubici e cilindrici: durante l'esecuzione del getto vengono prelevati 6 provini cubici (15 x 15 x 15cm), mediante casseforme standardizzate, e 6 campioni cilindrici ( $h = 25 \text{ cm}$ ,  $r = 8,5 \text{ cm}$ ), raccolti in segmenti di tubo in PVC (vedi fig. 2.18);
- Rimozione del calcestruzzo in eccesso e lisciatura della superficie del getto: con l'ausilio di un legno squadrato si rimuove l'eccesso di calcestruzzo dalla superficie del getto provvedendo quindi, attesi alcuni minuti per consentire l'addensamento della superficie, alla lisciatura manuale del getto mediante l'ausilio di spatola e cazzuola (vedi fig. 2.15b).



- **Figura 2.16** - Fasi del getto di prefabbricazione del pilastro.  
a) Centraggio della gabbia nella cassaforma;  
b) Fase di getto e costipamento con cestello a saracinesca;  
c) Lisciatura della superficie del getto.



- **Figura 2.17** - Costipamento del getto di prefabbricazione.



- **Figura 2.18** - Confezionamento dei provini per la valutazione empirica delle caratteristiche meccaniche del getto.
- a) Provini cilindrici per valutare  $f_{ck}$ ;
- b) Provini cubici per valutare  $R_{ck}$ .

## 2.4 – Getto di completamento

Dopo 7 giorni di maturazione, il pilastro e la trave prefabbricati vengono trasportati nel laboratorio di prove sulle strutture per poter effettuare la strumentazione degli spezzoni di completamento, l'assemblaggio del nodo ed infine il getto integrativo.

Il getto di completamento del nodo strutturale viene eseguito presso il La.P.S. in data 5/7/2010 utilizzando calcestruzzo caratterizzato da  $R_{ck} \geq 30 \frac{N}{mm^2}$  e fornito mediante autobetoniera dalla ditta SA.PA.BA.

La figura 2.19 mostra l'aspetto della trave dopo il primo getto di calcestruzzo.



- Figura 2.19 – Aspetto della trave dopo il getto di prefabbricazione.

Le fasi dell'esecuzione del getto integrativo hanno riguardato:

- Strumentazione delle barre da annegare nel getto di completamento: vengono applicati gli estensimetri necessari sulle barre longitudinali di nodo del pilastro e sugli spezzoni integrativi della trave (vedi fig. 2.20);





- **Figura 2.20** - Applicazione degli estensimetri sulle barre di nodo.

- Posizionamento di pilastro e trave prefabbricati in assetto definitivo: con l'ausilio del carroponete del laboratorio il pilastro viene sollevato e collegato alla struttura di contrasto, verificandone la messa in bolla verticale (vedi fig.2.21). Successivamente si è sollevata, sempre a mezzo di carroponete, la trave e la si è collocata in appoggio sull'apposita mensola prefabbricata del pilastro e sulla piastra del pistone di spinta, quindi è stata effettuata la messa in bolla orizzontale agendo sull'alzata del pistone (vedi fig.2.22). Durante questa operazione è stata posta attenzione a mantenere il bordo di innesto della trave a 2cm di distanza dal filo esterno del pilastro, come da progetto (vedi fig.2.23);



- Figura 2.21 - Fasi del fissaggio del pilastro alla struttura di contrasto.



- Figura 2.22 - Collocazione della trave in appoggio sulla mensola del pilastro e sulla piastra del pistone di spinta





- **Figura 2.23** – Particolare del posizionamento della trave sulla mensola prefabbricata.

- Disposizione delle armature di completamento: vengono posizionate le barre integrative uncinata infilando dalla parte posteriore del nodo, dove ancora le staffe sono mobili e raggruppate in modo da non ostacolare questa operazione. I cavi collegati agli estensimetri vengono raccolti e fatti uscire dalla parte superiore della trave. A questo punto possono essere fissate le staffe realizzando il passo di progetto (vedi fig.2.24a). Infine le barre uncinata vengono fissate mediante filo di ferro ad intervalli regolari e collegate trasversalmente, mediante 4 spezzoni  $\phi 18$  di ancoraggio, in corrispondenza delle gole di piegatura e dell'intersezione con le barre longitudinali del pilastro (vedi fig.2.24b). E' importante segnalare che le barre integrative strumentate sono posizionate nel seguente modo:

-Estradosso =>  $\Phi 20$  centrale lato Laps;

-Intradosso =>  $\Phi 18$  centrale lato Laps (vedi fig.2.25).



**Figura 2.24** - Armatura del nodo per il getto integrativo.

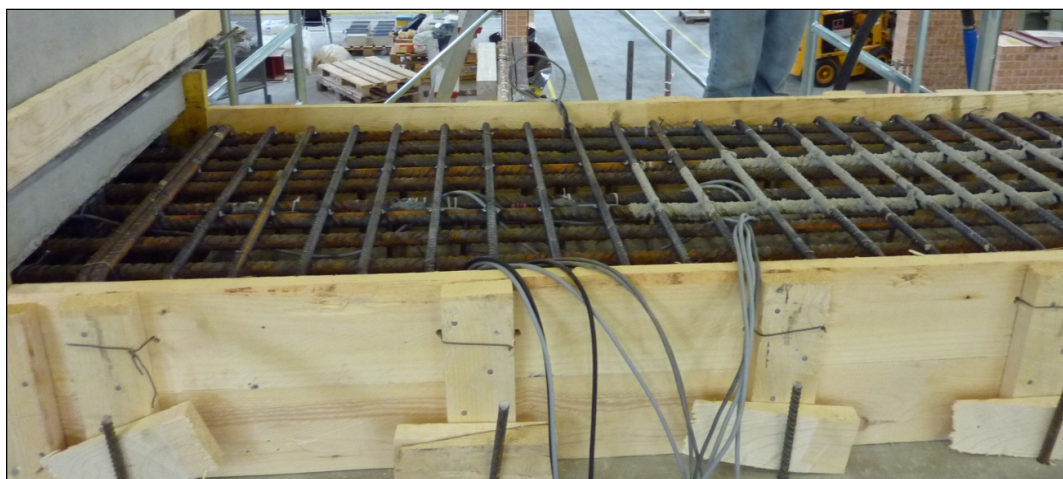
- a) Posizionamento barre uncinate e fissaggio staffe nodo col passo di progetto;
- b) Particolare dello spezzone  $\phi 18$  di ancoraggio posto alla base dell'uncino.



- **Figura 2.25** - Vista del posizionamento delle barre strumentate all'interno della gabbia.



- Diposizione delle casseforme di contenimento: gli operai della ditta APE provvedono ad allestire, mediante sponde in legno, le casseforme di contenimento del getto integrativo. Alcuni fori preventivamente praticati sulle facce superiori delle ali laterali della trave consentono di fissare, con l'ausilio di spezzoni di tondino e cunei di legno, le sponde disposte lateralmente alla trave (vedi fig. 2.26). I pannelli di confinamento sulle tre facce esterne del nodo e la restante sponda di estremità della trave vengono invece sorretti mediante morsetti a vite (vedi fig.2.27). L'aspetto più delicato del getto di completamento riguarda il completo riempimento della cavità di nodo; occorre quindi disporre i pannelli laterali di nodo in maniera tale che il bordo superiore superi di qualche centimetro il foro del pilastro ed interporvi dei distanziatori. Si consente in tal modo lo sfogo dell'aria ed il riscontro visivo della fuoriuscita di boiaccia ad attestare il completo riempimento;



- **Figura 2.26** - Sponde laterali di contenimento del getto.



- **Figura 2.27** - Allestimento delle casseforme di contenimento in legno.

- Esecuzione e vibratura del getto di completamento: il conglomerato viene versato, mediante apposito scivolo, dall'autobetoniera al cestello munito di gancio per il sollevamento (vedi fig. 2.28a). Il dosaggio del getto è manuale e avviene attraverso la saracinesca a tagliola (vedi fig. 2.28b). Si posiziona quindi il cestello in prossimità del nodo, a mezzo di carroponete, e si effettua il getto integrativo avvalendosi di due ponteggi disposti parallelamente alla trave (vedi fig. 2.28a e 2.29a). Si provvede innanzitutto al riempimento della cavità di nodo, operando simultaneamente la vibratura del calcestruzzo al suo interno mediante vibratore ad immersione (vedi fig.2.29b). Ci si sposta quindi verso l'estremità opposta della trave, per effettuare il riempimento e la costipazione, mediante vibratura, della tasca di completamento ed infine dell'estradosso;



**Figura 2.28** - Esecuzione del getto di completamento.

- a) Riempimento del cestello attraverso lo scivolo dell'autobetoniera;
- b) Apertura della saracinesca a tagliola.



- **Figura 2.21** - Costipamento del getto mediante vibratura.



- Prelievo di provini cubici e cilindrici: durante l'esecuzione del getto vengono prelevati 8 provini cubici (15 x 15 x 15 cm), e 4 cilindrici (vedi fig. 2.30);



- **Figura 2.30** - Confezionamento dei provini per la valutazione delle effettive caratteristiche meccaniche del calcestruzzo utilizzato per il getto di completamento.

- Rimozione del calcestruzzo in eccesso e lisciatura della superficie del getto: con l'ausilio di un legno squadrato si rimuove l'eccesso di calcestruzzo dalla superficie del getto provvedendo quindi, attesi alcuni minuti per consentire l'addensamento della superficie, alla lisciatura manuale del getto mediante l'ausilio di cazzuola. Si crea inoltre uno strato sovrabbondante di conglomerato all'estremità esterna della trave, ed all'atto della reazione di presa vi si poggia la piastra superiore di completamento del collegamento del pistone. Si viene così a creare una modellazione ottimale della superficie di contatto, evitando successivi interventi di inspessimento mediante malta a ritiro contrastato;



- **Figura 2.31** - Vista della superficie del getto lisciata.

- Maturazione del getto e successivo scassero: al fine di limitare l'evaporazione dell'acqua d'impasto il getto viene mantenuto coperto con dei teli, oltre che con i casseri di getto, e regolarmente bagnato. Nel giorno 12/7/2010, al settimo giorno di maturazione, si è provveduto a scassare la struttura.



- Figura 2.32 - Vista del nodo strutturale completo, dopo la scasseratura.

## Capitolo 3

### DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA DI CONTRASTO

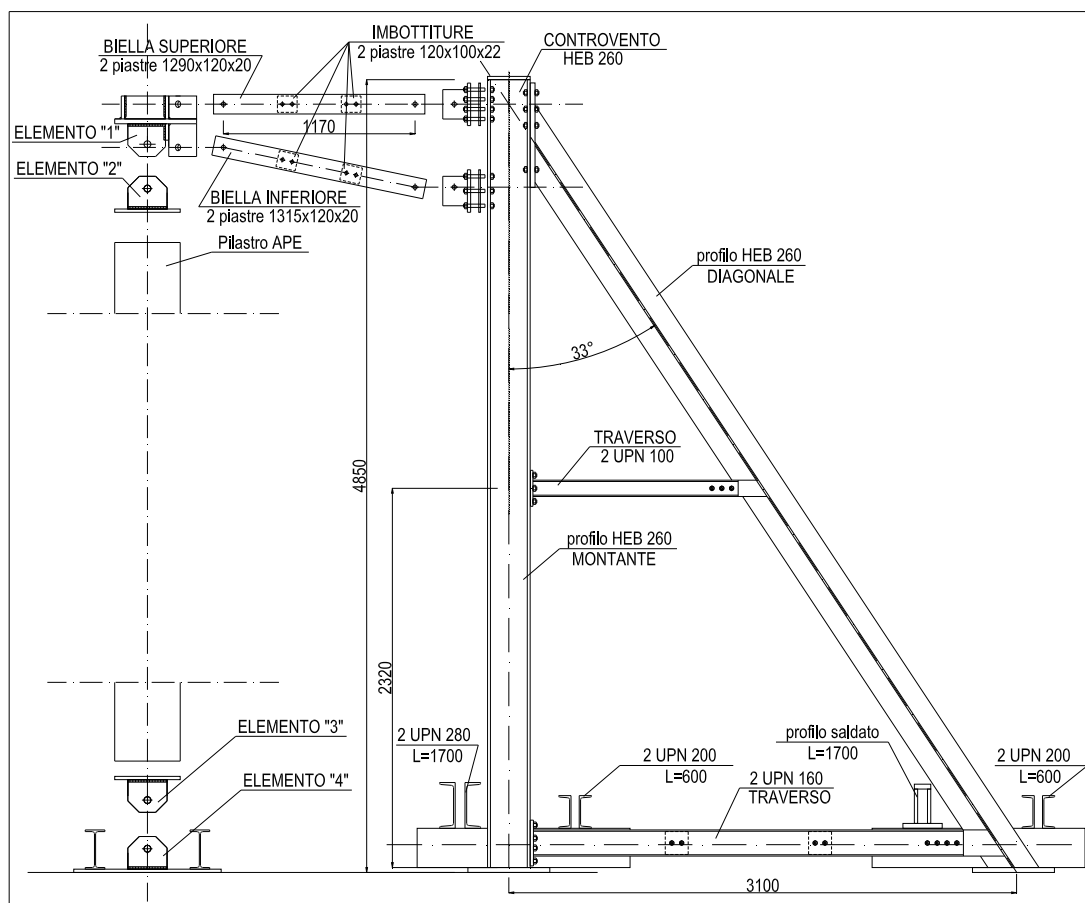
Nel presente capitolo verranno descritte le strutture accessorie predisposte in laboratorio per garantire, in fase di carico, l'efficace vincolamento del nodo d'angolo oggetto di prova. Ci si sofferma, anzitutto, sui due telai triangolari che compongono la struttura di controvento, rappresentandone gli elementi costituenti e descrivendone la disposizione; si descrivono, quindi, le strutture approntate per l'ancoraggio al suolo di tali controventi, rappresentandone lo schema di disposizione in pianta e le immagini dell'avvenuta realizzazione. Nel paragrafo 3.2 viene descritto lo schema dei vincoli applicati al nodo oggetto di prova, rappresentando e descrivendo le componenti delle strutture utilizzate per il collegamento al meccanismo di contrasto, al pistone di spinta ed al suolo. Infine, nel paragrafo 3.3, vengono descritte le fasi di collegamento di pilastro e trave di nodo ai suddetti vincoli, soffermandosi, in particolar modo, sulla serie di opere provvisoriale a cui si è fatto ricorso per garantire l'allestimento ottimale della prova.

#### 3.1 - Telai di controvento

La struttura ideata per consentire l'ancoraggio in sommità del pilastro è costituita da due telai di controvento triangolari, realizzati assemblando profilati in acciaio, le cui componenti sono elencate nello schema strutturale di figura 3.1.

I timpani di controvento sono disposti a formare, in pianta, un angolo retto, mentre gli assi geometrici del nodo strutturale sono contenuti nel piano avente come traccia al suolo la bisettrice di tale angolo (vedi schema di fig. 3.2). La definizione dello schema geometrico di tale telaio è stata condizionata: in elevazione dalle dimensioni delle componenti il nodo strutturale oggetto di prova; in pianta dalla disposizione delle prese di forza presenti nel solaio del La.P.S. (distribuite secondo i vertici di maglie di 1 m di lato), le quali fungeranno da innesto per le barre "DYWIDAG" che costituiscono gli ancoraggi a terra del sistema di prova.

La figura 3.3 fornisce un'immagine esplicativa della disposizione dei telai di controvento.



- **Figura 3.1** - Particolare costruttivo del singolo telaio di controvento.

Le barre “DYWIDAG” sono dotate di nervature continue, laminate a caldo, sincronizzate a formare una filettatura destrorsa sull’intera lunghezza della barra che le rendono particolarmente idonee all’utilizzo in sistemi di precompressione. Le barre utilizzate nella prova sono munite di idonei dadi e controdadi serrati a mano per mezzo di chiavi regolabili e tubo di prolunga; le tipologie in uso possiedono due differenti diametri nominali:  $\Phi 32$  per gli ancoraggi al solaio e la compressione del pilastro;  $\Phi 26,5$  per il collegamento del pistone alla trave [2].

Lo schema dei collegamenti a pavimento, corredato dall’indicazione dei profilati utilizzati, è riportato in figura 3.2.







- Figura 3.3 - Vista globale della struttura di contrasto.



- Figura 3.4 - Collegamento a pavimento del diagonale di controvento.



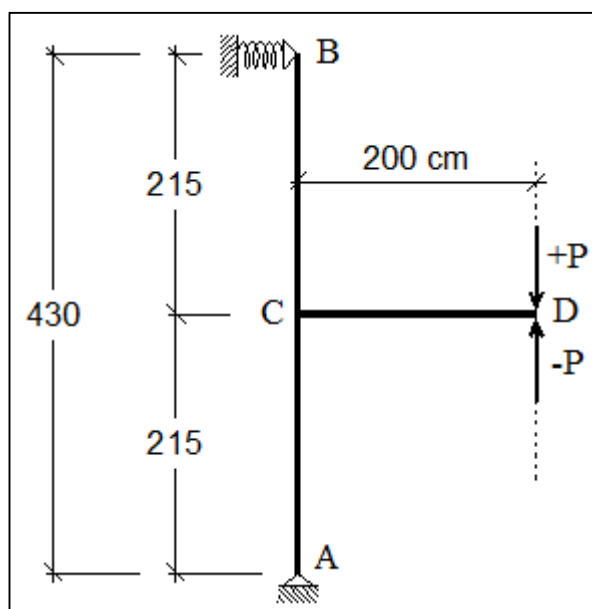
- Figura 3.5 - Collegamento a pavimento del montante di controvento, vista frontale.



- Figura 3.6 - Collegamento a pavimento del montante di controvento, vista posteriore.

### 3.2 - Tipologie di vincolamento delle estremità del nodo

Con la struttura di contrasto realizzata si vuole creare un sistema di vincolamento del nodo strutturale corrispondente allo schema statico ideato per la prova in esame, rappresentato in fig. 3.7 (in figura 3.8 si evidenzia la corrispondenza con lo schema reale). L'azione P, di trazione o compressione, viene applicata da un martinetto meccanico a vite vincolato mediante perno ad un sistema di piastre, ammortate a loro volta alla trave tramite barre DYWIDAG ( $\Phi 26,5$ ), come illustrato in figura 3.9. Grazie al collegamento mediante biella l'azione di contrasto tra motore e trave risulta priva di componenti flessionali.



- Figura 3.7 - Schema statico di prova.



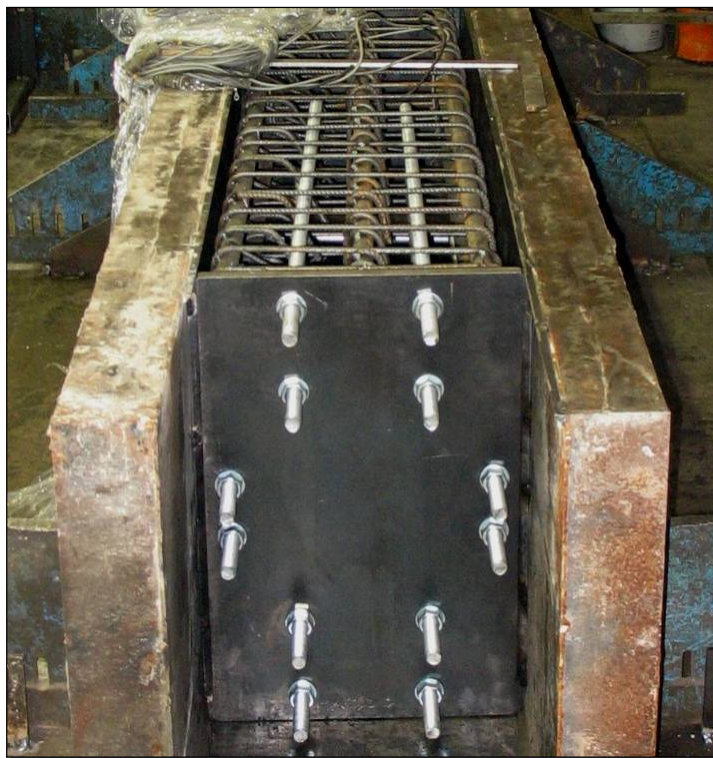


- Figura 3.8 - Schema reale di prova.

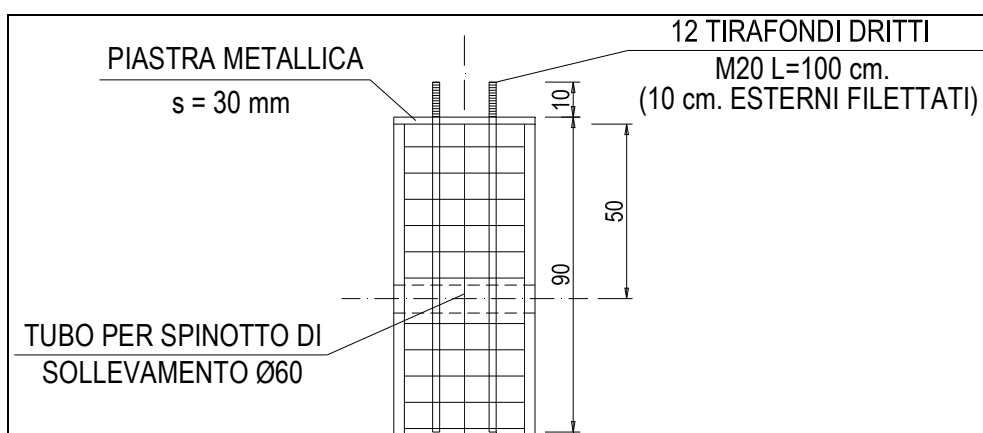


- Figura 3.9 - Particolare del collegamento a biella tra pistone e piastre d'ancoraggio alla trave.

Per realizzare i vincoli al piede (A) ed alla sommità (B) del pilastro si sono predisposte alle due estremità, in fase di prefabbricazione, una piastra di 3 cm di spessore, che funge da battuta per il collegamento alle carpenterie del telaio di prova, e 12 tirafondi dritti M20 di 100 cm di lunghezza ciascuno (figg. 3.10 e 3.11). Progettando in tal modo le strutture di nodo da sottoporre a prova (sia a tre che a quattro vie) risulta possibile utilizzare il medesimo telaio e le medesime carpenterie per effettuare molteplici prove.

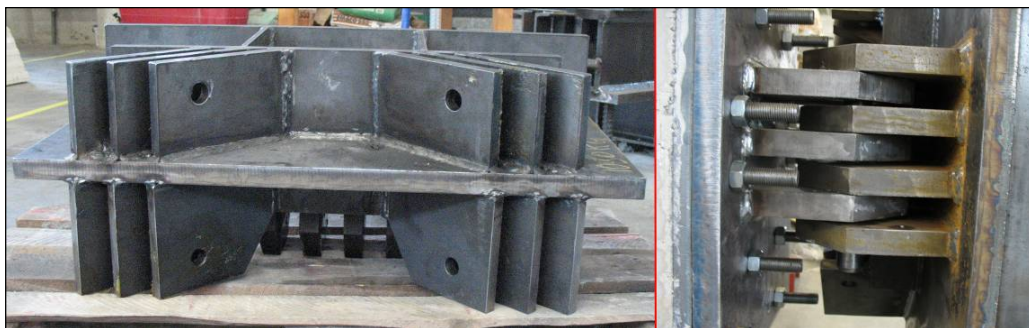


- Figura 3.10 - Particolare pre-getto di tirafondi e piastra d'estremità.

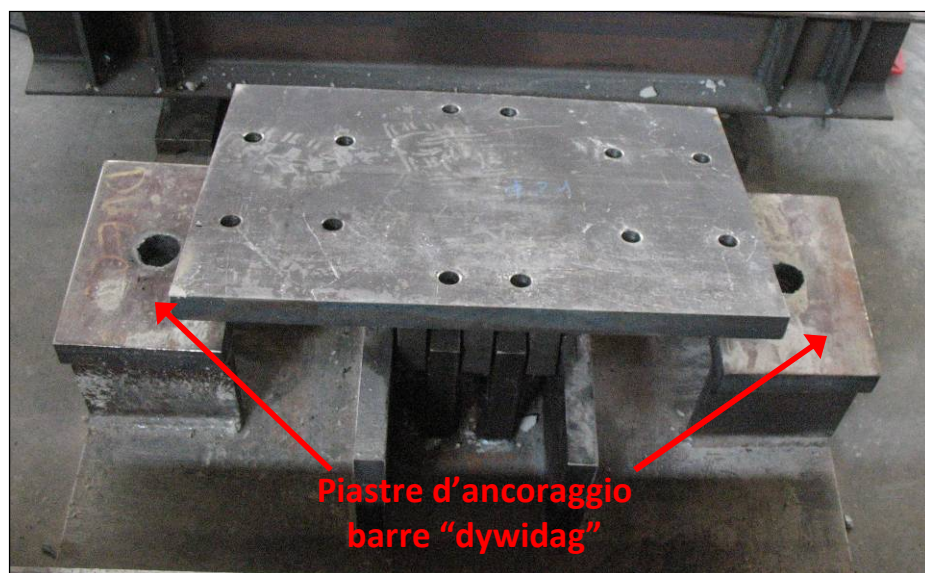


- Figura 3.11- Particolare strutturale di tirafondi e piastra d'estremità.

Le cerniere di collegamento rappresentate nello schema di fig. 3.7 sono realizzate mediante piastre munite di pettini forati, collegate a due a due mediante perno in acciaio speciale (figg. 3.12 e 3.13).

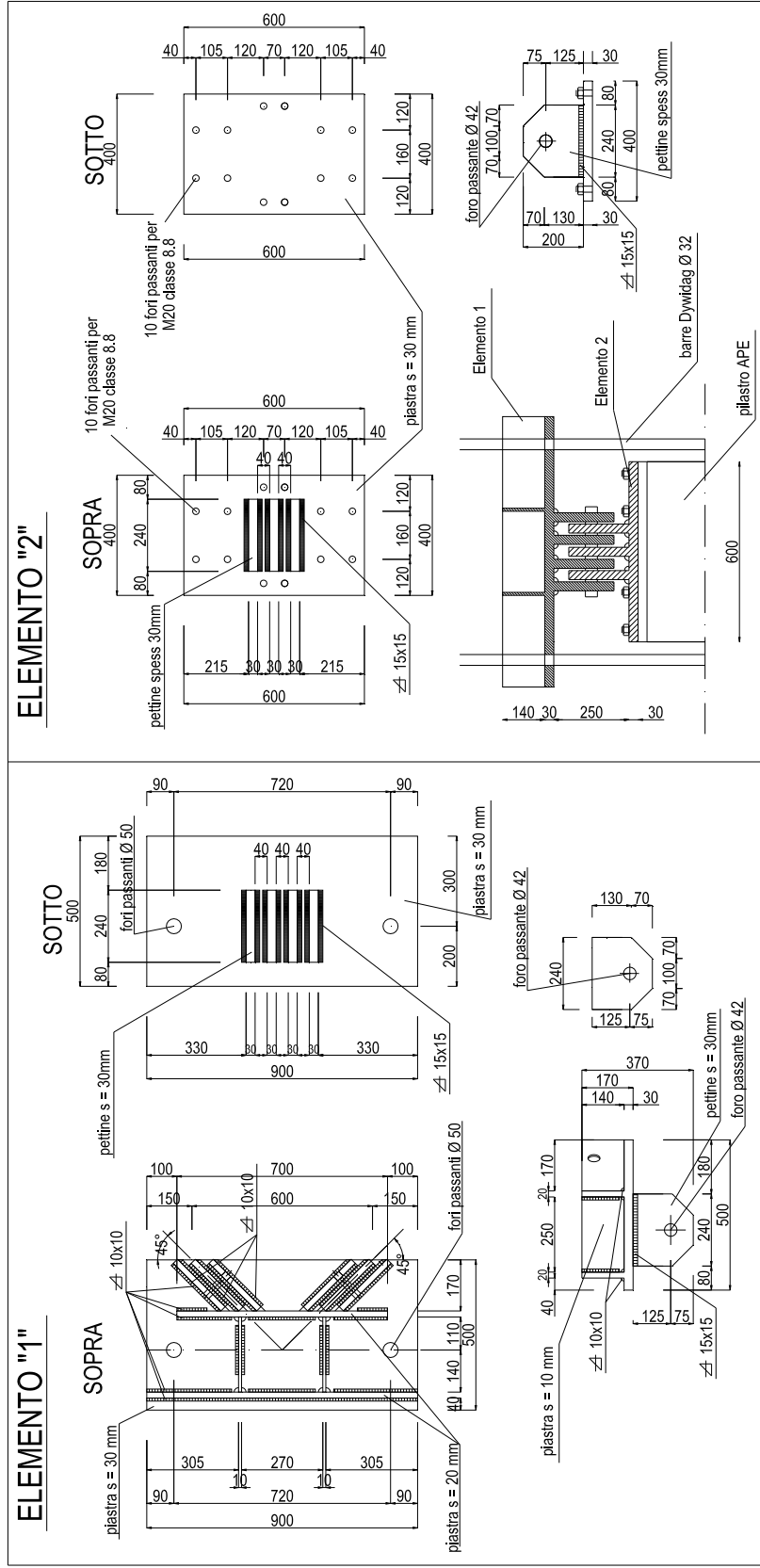


- **Figura 3.12** - Capitello superiore d'aggancio telaio-pilastro e particolare snodo a perno e pettini.

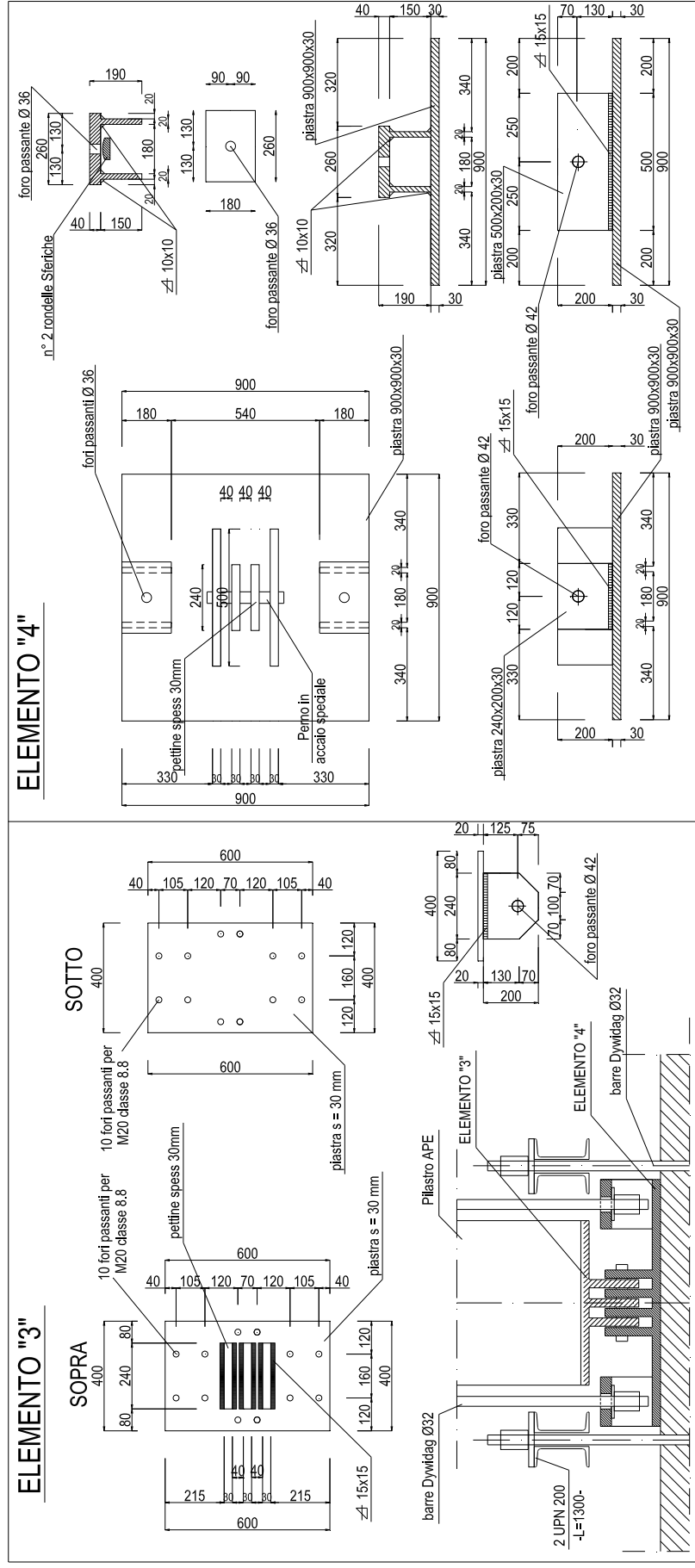


- **Figura 3.13** - Particolare del collegamento a snodo della piastra di vincolamento inferiore del pilastro.

La cerniera A è realizzata vincolando una piastra quadrata (lato = 90 cm e spessore = 3 cm) al solaio del laboratorio mediante un sistema di profilati irrigiditi (IPE 240 e UPN 200) serrati mediante barre DYWIDAG ( $\Phi 32$ ), e relativi bulloni, passanti nei fori predisposti nel solaio (fig. 3.17). A tale piastra sono saldati una serie di pettini ( $s = 30$  cm) che consentono l'innesto, mediante perno, con i pettini saldati alla piastra imbullonata all'estremità inferiore del pilastro; si viene così a costituire un vincolo a cerniera cilindrica che consente l'applicazione della reazione vincolare del solaio senza trasmettere azioni flettenti.



- **Figura 3.14** - Dettagli costruttivi piastre di collegamento superiori.



- **Figura 3.15** - Dettagli costruttivi piastre di collegamento inferiori.

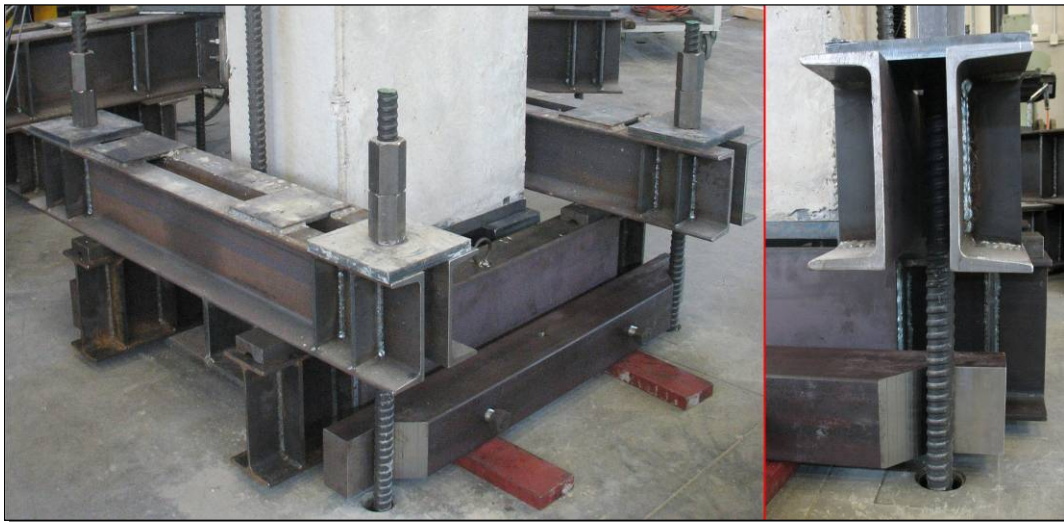


Alla piastra di base sono inoltre saldati due piastre forate, da 40 mm di spessore (vedi immagine di fig. 3.13 e particolari costruttivi di figg. 3.14 e 3.15), che fungono da aggancio per una coppia di barre DYWIDAG ( $\Phi 32$ ,  $L = 5,5$  m); tali barre vengono agganciate alla piastra del capitello imperniato alla sommità del pilastro e quindi tese ciascuna di 25 kN, mediante interposizione di martinetti cavi tipo **Enerpac RCH-603** da 600 kN, per simulare la compressione che in opera il pilastro riceve dal peso delle strutture sovrastanti. Particolari esplicativi del posizionamento di tali martinetti cavi e del fissaggio delle barre DYWIDAG sono forniti dall'immagine 3.16.



- **Figura 3.16** - Posizionamento dei martinetti cavi sul capitello e particolare del serraggio delle barre dywidag alla base.

Durante l'esecuzione della prima prova di caricamento ciclico del nodo strutturale a quattro vie tali trazioni hanno reso instabile il vincolamento alla base del pilastro a causa della deformazione della piastra di base; per ovviare a tale inconveniente si sono introdotti ulteriori profilati pieni (sezione 10x10 cm) sagomati (fig. 3.17) che hanno svolto il duplice compito di ridurre la deformabilità della piastra, grazie alla notevole rigidità flessionale, e scongiurare eventuali scorrimenti orizzontali fungendo da contrasto alle barre di ancoraggio al solaio.



- **Figura 3.17** - Ancoraggio del pilastro e particolare dell'irrigidimento mediante profilato pieno di sezione 10x10 cm sagomato.

L'appoggio cedevole B è realizzato collegando mediante perno i pettini della piastra, imbullonata alla sommità del pilastro, ai pettini del capitello di aggancio delle bielle dei timpani di contrasto (fig. 3.18).



- **Figura 3.18** - Snodo a pettini di sommità interposto tra il pilastro e le bielle di aggancio ai telai di controvento.

Il cedimento elastico del vincolo B rappresenta lo spostamento orizzontale che il telaio di contrasto subisce nel piano del nodo; teoricamente determinabile, al variare dell'intensità della spinta di prova, come somma delle componenti di spostamento della sommità dei singoli timpani correlate ad un'azione orizzontale unitaria complanare al nodo. In realtà, dai dati di prova, risulta essere presente anche una componente di scorrimento dovuta alle tolleranze del sistema di collegamenti bullonati della struttura di contrasto (vedi fig. 9.2, par. 9.2).

### 3.3 - Fasi di collegamento del nodo ai vincoli

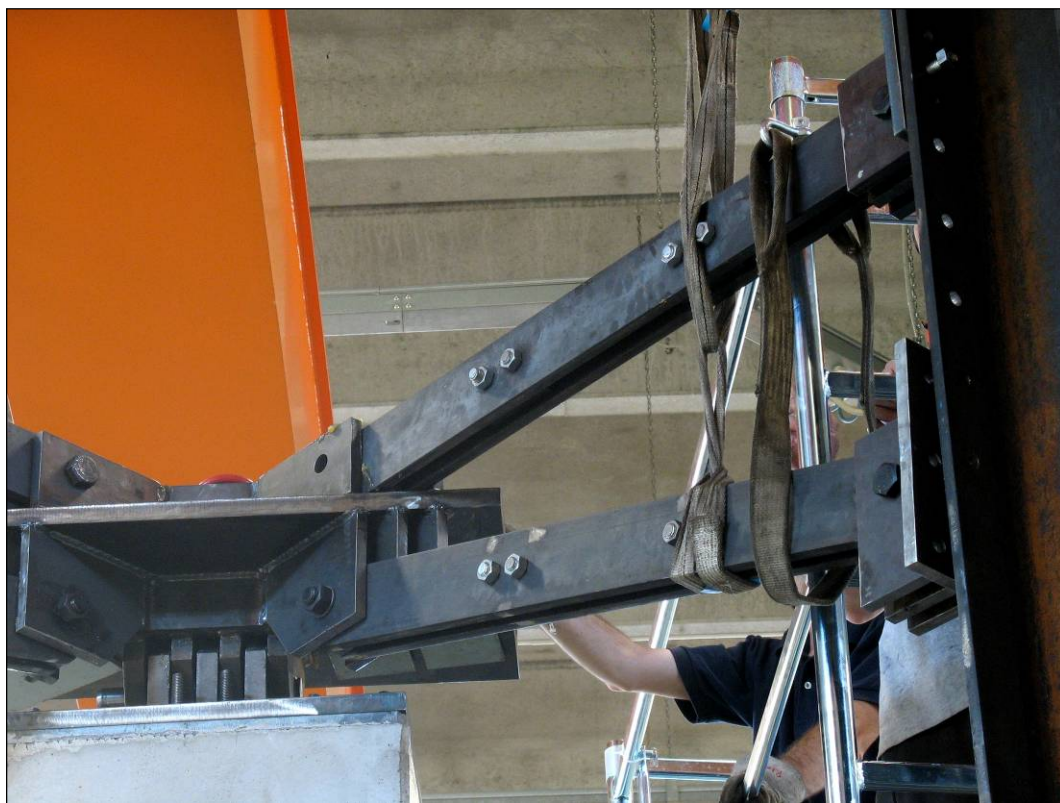
La sequenza adottata per l'assemblaggio ed il collegamento del nodo al telaio di contrasto è stata dettata dai mezzi d'opera a disposizione (carroponte da 10 t, muletto e ponteggio mobile di altezza 5 m) e dall'ingombro degli elementi di carpenteria metallica di collegamento (piastra di base, capitello di sommità), preferendo collegare le piastre a pettine, di sommità e di base, al pilastro ancora coricato orizzontalmente.



- Figura 3.19 - Fase di sollevamento del complesso colonna-piastre di snodo.

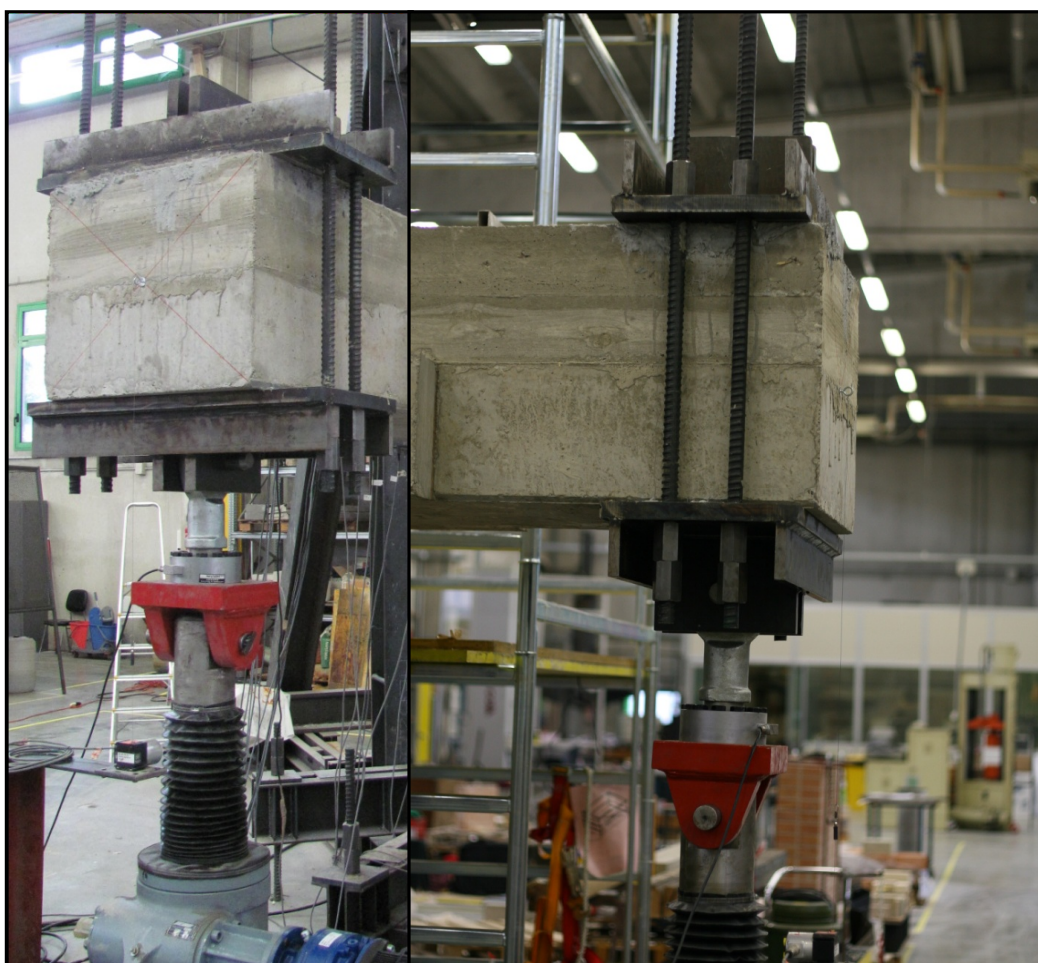


Si è quindi collegato il gancio del carroponte al capitello di sommità del pilastro mediante idonea catena (il tutto raggiunge un peso di circa 3.500 Kg), agganciata mediante un sistema di piastre e golfari alle asole predisposte all'alloggiamento delle barre DYWIDAG di compressione (fig. 3.19) e si è provveduto al sollevamento in verticale del pilastro ed al suo collocamento in sede di prova.



- **Figura 3.20** - Fase di collegamento del capitello di sommità pilastro alle bielle del telaio di controvento.

L'estremità libera della trave viene vincolata al pistone di spinta attraverso due piastre in acciaio, una di appoggio e una di completamento, munite di irrigidimenti longitudinali. Il serraggio reciproco delle due piastre parallele viene realizzato ad opera di quattro barre filettate  $\Phi 26$  e dei relativi dadi (vedi fig.3.21).



- Figura 3.21 - Vincolamento dell'estremità libera della trave al pistone di spinta.

Il pistone di spinta viene vincolato al solaio in maniera analoga al pilastro; attraverso profilati e barre in acciaio. Viene posta molta cura nel posizionare il pistone per renderlo in asse con il pilastro e con la trave, e per avere un braccio della forza pari a 2m dall'asse del pilastro.

La piastra di base del pistone viene fissata attraverso 2 IPE sormontati da 2 elementi, ognuno composto da 2 UPN accoppiati, i quali sono attraversati nella parte centrale da 4 barre filettate  $\Phi 32$  munite di dadi e controdadi. L'ancoraggio al piano di calpestio è realizzato attraverso il serraggio dei dadi in battuta su quattro piastre appoggiate sugli UPN accoppiati (vedi fig.3.22).



- **Figura 3.22** - Vincolamento della base del pistone di spinta al solaio.

## Capitolo 4

### STRUMENTAZIONE

In questo capitolo si descrivono gli strumenti utilizzati per lo svolgimento della prova.

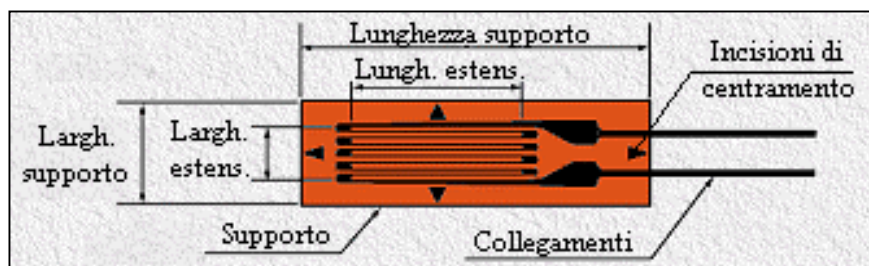
#### 4.1- Estensimetri

L'estensimetro, o *strain gauge*, è uno strumento atto a misurare la deformazione locale della superficie del corpo al quale viene applicato in continuo con la legge di variazione del carico (non sono misure discrete).

In particolare, quelli usati nelle applicazioni di laboratorio sono estensimetri elettrici che si basano sull'effetto piezoresistivo del materiale conduttore utilizzato, ossia sulla variazione di resistenza elettrica che il materiale stesso subisce quando si deforma in seguito alla deformazione della superficie del corpo a cui è applicato.

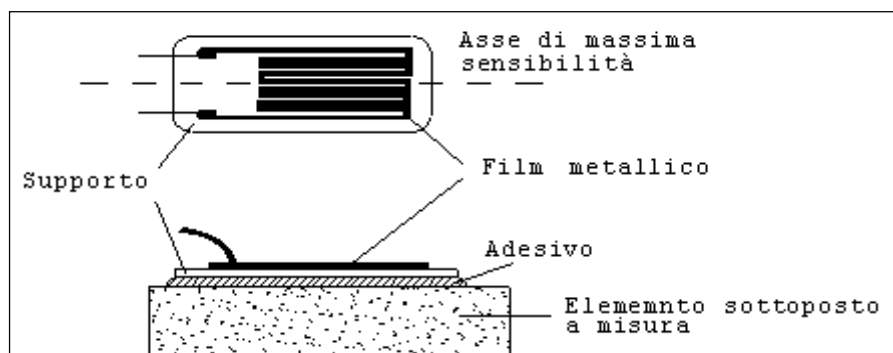
L'estensimetro viene incollato al materiale di cui si vuole definire la deformazione, successivamente lo si collega elettricamente inserendolo in un ramo di un circuito opportunamente alimentato. Si procede mettendo sotto carico il materiale che sarà dunque soggetto ad un certo stato deformativo che interesserà di conseguenza anche l'estensimetro. Ciò determina una variazione della tensione d'uscita che viene percepita dall'apparecchiatura inserita nel circuito e che, grazie ad una precedente taratura, permette di risalire dalla variazione della grandezza elettrica alla deformazione che ne è stata la causa.

Gli estensimetri elettrici più comuni sono quelli metallici costituiti da un filo di lega speciale, generalmente *manganina* (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni) o *costantina* (60% Cu, 40% Ni) di resistenza elettrica nota e di diametro molto piccolo (da 0,01 a 0,03 mm), disposto a serpentina su un supporto di carta o resina sintetica al quale aderisce (vedi fig. 4.1).



- Figura 4.1 - Componenti principali di un estensimetro.





- Figura 4.2 – Schema di applicazione di un estensimetro.

Il supporto viene a sua volta incollato con un opportuno adesivo (Z 70, nel caso in esame) sulla porzione della superficie del corpo in cui si desidera misurare la deformazione (vedi fig. 4.2).

La misura che tali strumenti sono in grado di effettuare risulta essere il valore medio della deformazione  $\varepsilon = \Delta l / l$  che la superficie del corpo subisce in tale zona. Qualora si preveda la concentrazione di sforzi in determinate zone risulta quindi opportuno impiegare estensimetri con una base piccola, rilevando in tal modo un valore il più prossimo possibile al reale valore della deformazione locale. Tuttavia, minore risulta l'ampiezza della base, maggiore deve essere l'amplificazione necessaria per ottenere la medesima sensibilità dello strumento, col rischio di aumentare eccessivamente gli errori. In definitiva occorrerà di volta in volta scegliere l'ampiezza della base in modo da ottenere un compromesso accettabile fra le due esigenze.

Molto spesso la scelta di una maggiore o minore lunghezza della base è dettata dalle caratteristiche della superficie del corpo. Nel caso dell'acciaio, trattandosi di un materiale molto omogeneo, si ricorre a basi ridotte variabili da 3 a 10 mm. Anche il tipo di adesivo utilizzato per l'incollaggio deve essere opportunamente scelto in funzione della superficie sulla quale si intende operare. Per l'acciaio si ricorre ad adesivi mono-componente quali i cianoacrilati (solitamente lo Z 70).

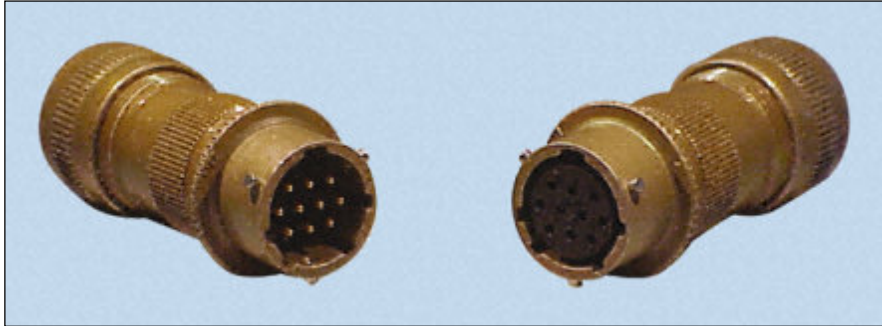
Nel caso in esame gli estensimetri sono applicati solo sulle barre d'acciaio e sono di due tipologie:

- Lunghezza 6mm e costante di conversione (*gauge factor*)  $k=2,10$ ; sono stati usati sulle barre di diametro maggiore;



- Lunghezza 3mm e costante di conversione (*gauge factor*)  $k=2,13$ ; sono stati usati sulle barre di diametro minore;

Tutti gli estensimetri (con resistenza di  $120\ \Omega$ ) utilizzati nella prova sono collegati alla centralina di acquisizione mediante lo schema descritto nella figura 4.4. Con l'ausilio dell'immagine di figura 4.14 risulta possibile riconoscere i cavi di collegamento e la loro connessione al sistema di acquisizione mediante connettori Commital IPT (vedi fig. 4.3)



- **Figura 4. 2** - Dettaglio dei connettori Commital IPT maschio e femmina usati per gli estensimetri.



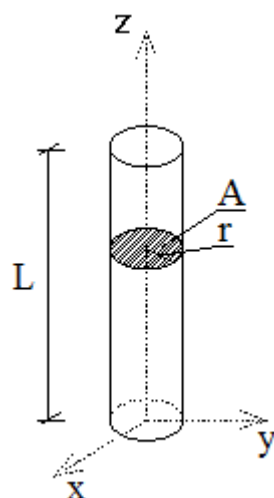
- **Figura 4.3** - Schema di collegamento tra estensimetro e centralina di acquisizione; vista posteriore del connettore maschio Commital IPT.

Gli estensimetri sono applicati sul lato delle barre, ovvero il piano del supporto dello strumento è parallelo al piano in cui agisce il momento flettente generato dal carico applicato. Questa soluzione (diversa rispetto alla precedente sperimentazione sul nodo a tre vie), nasce dalla considerazione che gli estensimetri hanno un diverso comportamento a seconda che siano posti in trazione o compressione (estradosso o intradosso della barra o viceversa in base al momento agente). Si cerca dunque di

ottenere lo stesso tipo di risposta in entrambe le condizioni descritte attraverso lo stratagemma del posizionamento laterale degli estensimetri rispetto alle barre.

#### 4.1.1 - Principio di funzionamento

Si considera un conduttore elettrico (estensimetro schematizzato in figura 4.5) lungo  $L$ , con area della sezione trasversale (supposta circolare) pari ad  $A$ , e realizzato con un materiale di resistività  $\rho$ .



- Figura 4.4 - Schematizzazione di un estensimetro.

Per la “seconda” legge di Ohm si ha che la resistenza  $R$  del conduttore vale:

$$R = \rho \frac{L}{A};$$

Si calcola il differenziale di  $R$ :

$$dR = \frac{L}{A} d\rho + \frac{\rho}{A} dL - \rho L \frac{dA}{A^2} \quad \left( \text{Infatti: } \int \frac{1}{A^2} dA = \int A^{-2} dA = -1A^{-1} + c = -\frac{1}{A} + c \right);$$

$$dR = R \frac{d\rho}{\rho} + R \frac{dL}{L} - R \frac{dA}{A}$$

Si definisce  $r$  = raggio della sezione corrente e si calcola:

$$\frac{dR}{R} = \text{variazione specifica di resistenza};$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{\pi \cdot r^2} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_z - \frac{2\pi \cdot r \cdot dr}{\pi \cdot r^2} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_z - 2 \frac{dr}{r};$$

Si ha che  $\frac{dr}{r}$  è pari alla dilatazione lineare specifica nelle direzioni giacenti nel piano x,y

della sezione; quindi:  $\frac{dr}{r} = \varepsilon_x = \varepsilon_y$

Inoltre si ha che:  $\varepsilon_y = \varepsilon_x = -\nu \cdot \varepsilon_z$ ;

dove:  $\nu = \text{coefficiente di Poisson}$ ;

Quindi si arriva alla relazione:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_z - 2(-\nu \cdot \varepsilon_z) = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu)\varepsilon_z \quad (A)$$

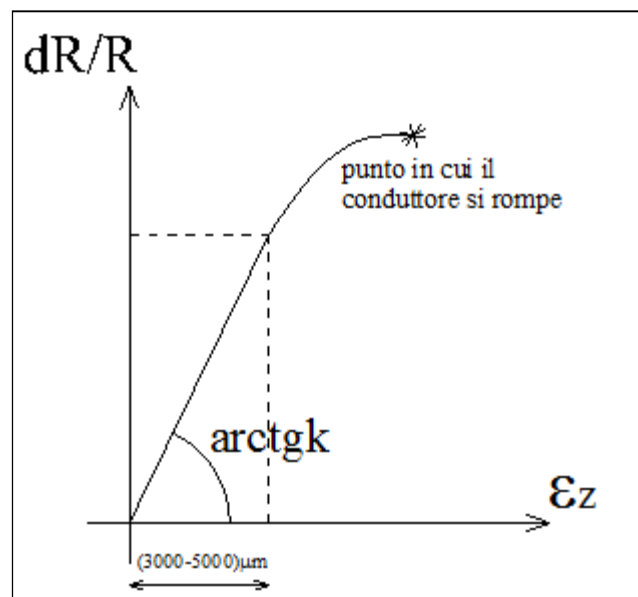
In prima approssimazione si considera che la resistività  $\rho$  non si modifichi in seguito alla deformazione (in realtà non è così perché, se il materiale si deforma, allora ri-arrangia il reticolo cristallino). Quindi, durante la deformazione, variano  $L$  e  $A$ , mentre  $d\rho = 0$ .

Quindi:  $\frac{d\rho}{\rho} = 0$

Dunque l'espressione (A) diventa:

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu)\varepsilon_z = k \cdot \varepsilon_z; \quad \text{dove: } k = 1 + 2\nu = \text{fattore di taratura dell'estensimetro}$$

Si rappresenta il legame lineare tra la variazione specifica di resistenza elettrica  $\frac{dR}{R}$  e la variazione specifica di lunghezza nella direzione z nel diagramma riportato in figura 4.6.



- Figura 4.5 - Relazione tra variazione specifica di resistenza e di lunghezza per un estensimetro.

Una volta incollato l'estensimetro sulla barra parallelamente all'asse z, esso subisce la stessa deformazione.

Si misura attraverso un galvanometro la variazione specifica di resistenza elettrica e si calcola:

$$\varepsilon_z = \frac{dR}{R} \cdot \frac{1}{k} = \begin{cases} \text{variazione specifica di lunghezza} \\ \text{della barra nella direzione z} \end{cases}$$

#### 4.1.2 - Esempio applicativo

Le fasi della corretta applicazione di un estensimetro su una barra d'acciaio si articolano come segue:

Preparazione della superficie:

- Smerigliatura della barra mediante flessibile: viene effettuata sul lato della barra per i motivi precedentemente illustrati. E' necessario ottenere una superficie piana e liscia più larga del supporto dell'estensimetro (che è circa 3 mm);
- Sgrassare: si sfrega la superficie smerigliata con una garza dopo aver spruzzato lo sgrassante spray CSM-1A, a base di clorotene;
- Carteggiatura a secco: effettuata con carta vetrata grana 120 o 150 (vedi fig.4.7);



- **Figura 4.7** – Carteggiatura a secco.

- **Carteggiatura con condizionatore:** viene usato il condizionatore M-Prep Conditioner A, una soluzione a base di acido fosforico ( $\text{ph}=1$ ) diluito all'1‰, in grado di accelerare il processo di pulitura introducendo una lieve corrosione della superficie metallica (vedi fig. 4.8). Si continua a carteggiare rimuovendo periodicamente con garze il residuo nero del prodotto;



- **Figura 4.6** - Condizionatore utilizzato.

- Asciugatura:
- Tracciamento le linee di riferimento: con un pennarello indelebile si tracciano le linee di riferimento per il posizionamento dell'estensimetro;
- Applicazione del neutralizzatore: si sfrega la superficie con una garza dopo averla bagnata col neutralizzatore M-Prep Neutralizer 5A, una soluzione a base di ammoniaca (ph=10) diluita all'1‰, in grado di riportare il ph della superficie a valori pressoché neutrali compatibili con quelli dell'adesivo (vedi fig. 4.9).

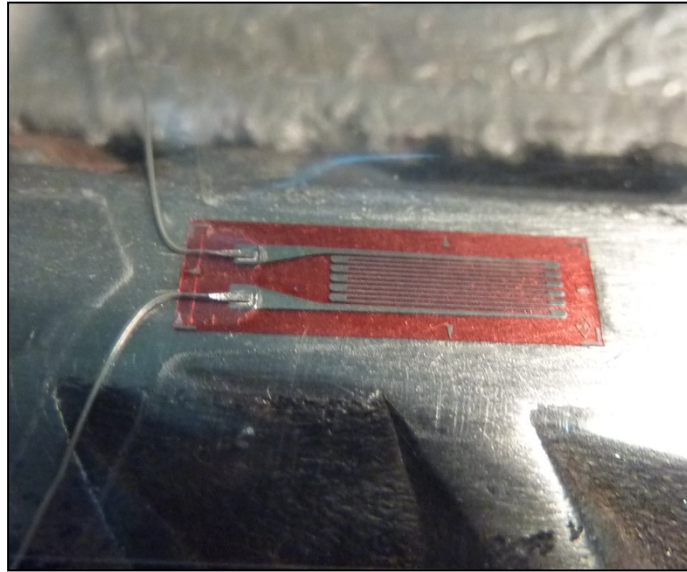


- **Figura 4.9** – Nastro PCT-2A e neutralizzatore.

#### Incollaggio:

- Posizionamento del nastro adesivo sull'estensimetro: maneggiando l'estensimetro con le pinzette lo si toglie dall'involucro, si allargano i due collegamenti e lo si posiziona sopra un vetro pulito. Successivamente vi si pone sopra un pezzo di nastro adesivo tipo PCT-2A (vedi fig. 4.9);
- Applicazione sulla barra: si solleva l'estensimetro attraverso il risvolto precedentemente operato sul nastro adesivo e lo si colloca con precisione sulla barra facendo combaciare il centro dell'estensimetro (identificato da due triangolini sul supporto) con le linee di riferimento precedentemente tracciate (vedi fig. 4.11);





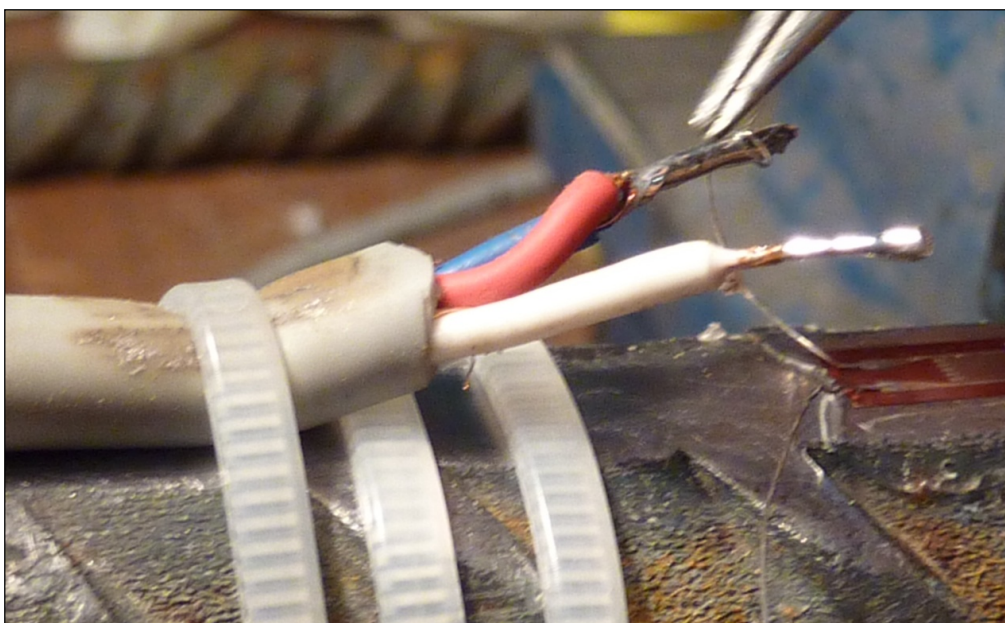
- **Figura 4. 7** - Applicazione dell'estensimetro sulla barra mediante l'apposito nastro adesivo.

- Incollaggio: si solleva un lembo del nastro adesivo e si pone l'estensimetro a  $45^\circ$ . Si fa cadere una goccia di adesivo (Z 70) sulla sommità dell'estensimetro e la si fa scivolare fino alla base. Si richiude poi il nastro adesivo nella posizione iniziale (vedi fig. 4.12);



- **Figura 4.8** - Applicazione dell'adesivo Z 70 sull'estensimetro.

- Pressione: col pollice fermo si applica una pressione sopra il nastro adesivo (interponendo un foglio di teflon per evitare l'adesione al dito) per circa un minuto;
- Rimozione del nastro adesivo: lentamente si rimuove il nastro adesivo (assicurandosi che il collante abbia fatto presa);
- Fissaggio del cavo alla barra: il cavo viene ancorato alla barra mediante fascette in plastica;
- Saldatura dei collegamenti al cavo: i due collegamenti dell'estensimetro vengono saldati (mediante saldatura a stagno) alle terminazioni del cavo precedentemente posizionato. Viene posta attenzione perché i collegamenti non siano a contatto con la barra (vedi fig. 4.14);



- **Figura 4.9** - Posizionamento dei collegamenti e saldatura alle terminazioni del cavo.

- Spalmatura del prodotto impermeabilizzante: al fine di impermeabilizzare lo strumento e la relativa connessione al circuito di alimentazione, viene spalmato un protettivo poliuretanico ad essiccamento chiamato "*Coat A - Air-Drying Polyurethane Coating*";
- Applicazione del protettivo siliconico: lo strumento e la relativa connessione viene ricoperta da uno strato di silicone 3145 RTV (vedi fig.4.15) al fine di rendere il tutto perfettamente stagno e protetto dagli urti con gli aggregati in fase di getto del calcestruzzo;



- **Figura 4.10** - Applicazione del silicone per la protezione dello strumento in fase di getto del cls.

- Test con centralina: il connettore del cavo saldato all'estensimetro viene collegato alla centralina (Vishay serie P3) e viene testata la stabilità del segnale che arriva dall'estensimetro.

L'aspetto finale dell'estensimetro montato sulla barra dopo le varie fasi descritte è quello rappresentato in figura 4.16.



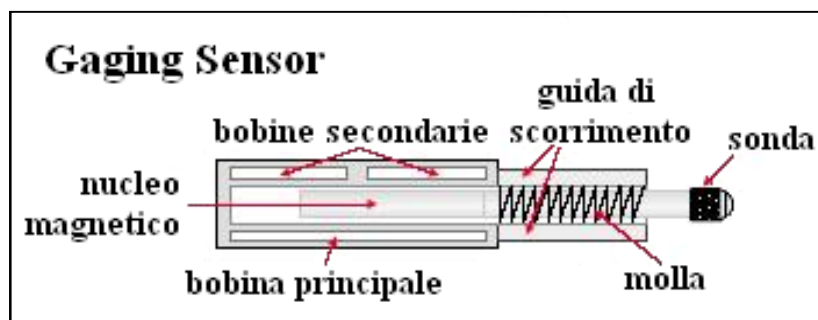
- **Figura 4.16** – Aspetto finale dell'estensimetro montato sulla barra.



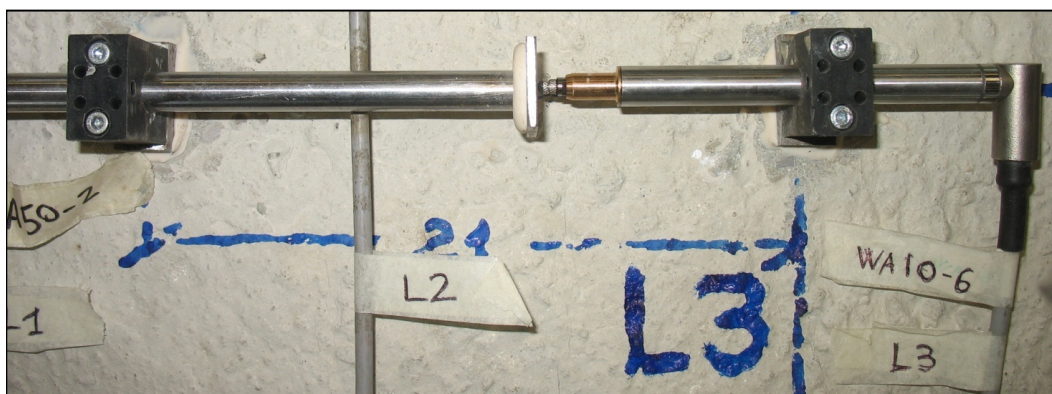
## 4.2 - LVDT

L'LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) è un dispositivo in grado di misurare lo spostamento relativo di un punto prestabilito rispetto al punto di fissaggio della base strumentale. Il fenomeno fisico che sta alla base del suo funzionamento è l'induzione elettromagnetica. Infatti è dotato di un nucleo immerso in un campo magnetico il cui movimento relativo rispetto a tre solenoidi causa una variazione del segnale elettrico in uscita dal circuito. Questa variazione viene rapportata, attraverso una preventiva taratura, alla variazione di posizione del punto di fissaggio rispetto alla base strumentale.

Nella figura 4.17 sono indicate le componenti principali di un LVDT, mentre la figura 4.18 presenta un esempio di applicazione alla struttura in esame.



- Figura 4.17 – Schema della sezione longitudinale di un LVDT.



- Figura 4.18 – Esempio applicativo di un LVDT.

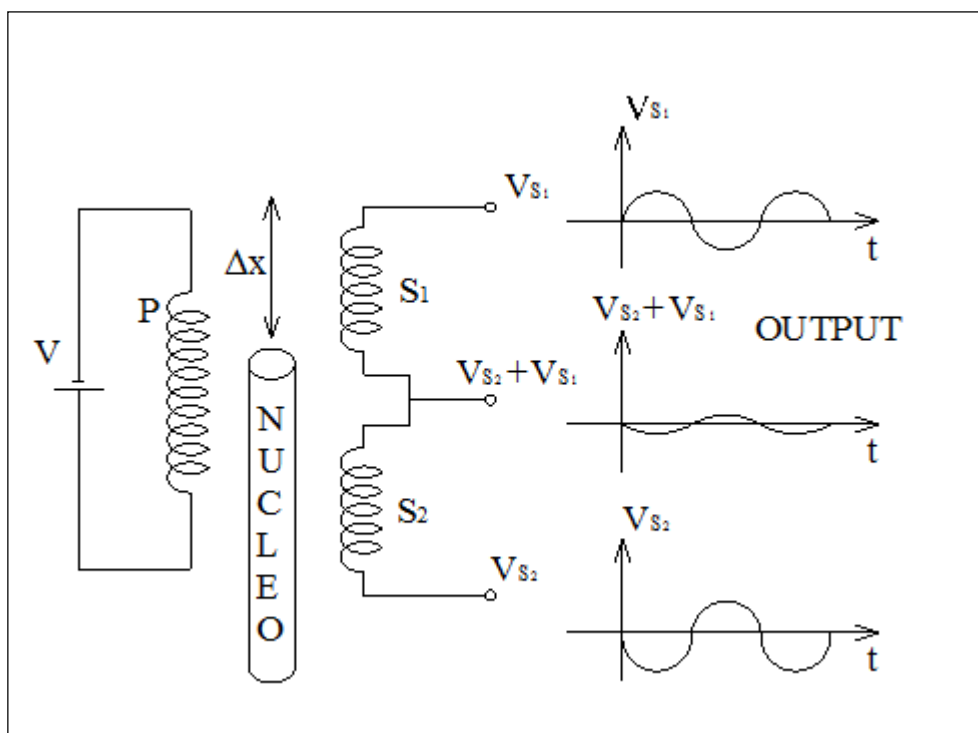
### 4.2.1 - Descrizione del principio di funzionamento

Il circuito elettromagnetico è costituito da un solenoide principale P (*primary coil*), i cui collegamenti sono chiusi sull'alimentazione in ingresso, e da due solenoidi secondari (*secondary coils*),  $S_1$  ed  $S_2$ , avvolti in contro-fase l'uno rispetto all'altro. L'asse di tali solenoidi, rappresentati in fig. 4.19 come affiancati per maggiore chiarezza, in realtà coincide con l'asse del nucleo ferromagnetico (*core*).

Il solenoide P, alimentato da corrente alternata modulabile in tensione dalla centralina d'acquisizione, genera un campo d'induzione magnetica; tale campo, concatenato ai due solenoidi secondari, è variabile nel tempo e perciò induce in essi correnti alternate. Il campo magnetico generato determina anche la magnetizzazione del nucleo ferromagnetico, dunque qualora esso occupi una posizione tale da conferire "simmetria" al trasformatore si viene a generare un flusso concatenato da  $S_1$  identico a quello concatenato da  $S_2$ . Dato l'avvolgimento in verso opposto delle bobine secondarie, opposte risulteranno anche le tensioni  $V_{S1} = -V_{S2}$ , ottenendo quindi una tensione agli estremi del circuito secondario, che rappresenta l'output del trasduttore, di valore nullo. Se, al contrario, il nucleo si muove dalla posizione di zero il voltaggio indotto sul solenoide del circuito secondario al quale si è avvicinato aumenta a discapito dell'altro che diminuisce, generando così un output diverso da zero e linearmente proporzionale allo spostamento del nucleo ( $\Delta x$ ).

L'avvicinamento (o l'allontanamento) del nucleo determina l'eccitazione di un numero maggiore (o minore) di spire, appartenenti ai solenoidi, e quindi un aumento (o diminuzione) proporzionale del campo magnetico concatenato. Per correlare la differenza di potenziale in uscita con lo spostamento registrato dallo strumento occorre conoscere la costante di proporzionalità tra le due grandezze. Si procede pertanto alla taratura degli strumenti assegnando ciclicamente spostamenti noti agli LVDT e rilevando le differenze di potenziale in uscita.





- Figura 4. 11 - Schema di funzionamento del circuito di un LVDT.

Attraverso la taratura si sono ricavate le costanti riportate nella tabella 4.1:

STRUMENTO	COSTANTE DI TARATURA
WA 50 - 2	5019,5
WA 20 - 10	19,964
WA 10 - 6	0,9924
WA 50 - 1	499,689
WA 20 - 6	198,498
WA 50 - 3	5013,1
WA 20 - 7	199,046
WA 10 - 5	0,99
WA 10 - 2	0,9909
WA 10 - 1	0,9903
WA 50 - 4	501,331

- Tabella 4.1 – Costanti di taratura degli LVDT.

#### 4.2.2 - Descrizione delle fasi di montaggio

Sul nodo strutturale sono montati undici LVDT seguendo le seguenti fasi di applicazione:

- Tracciatura delle linee di riferimento per il posizionamento delle basette (vedi fig. 4.20);

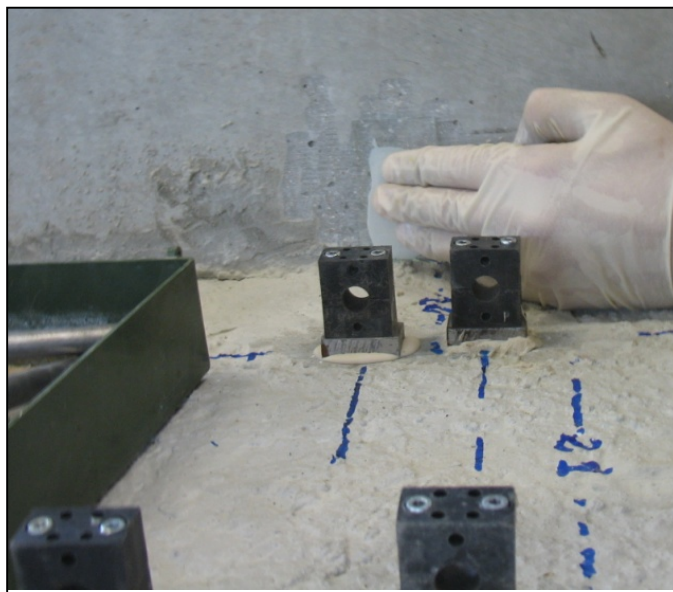


- **Figura 4.12** - Tracciatura delle linee di riferimento.

- a) Estradosso della trave;
- b) Intradosso della trave.

- Smerigliatura della superficie di incollaggio: per avere un incollaggio più efficace viene smerigliata mediante flessibile la superficie di calcestruzzo in corrispondenza dei punti in cui andranno posizionate le basette che fungono da supporto per LVDT e per la superficie di battuta della sonda;

- Pulizia della superficie di incollaggio: per rendere l'adesione tra calcestruzzo e basetta più efficace, si procede allo sgrassaggio della superficie precedentemente smerigliata mediante alcool isopropilico GC-6;
- Incollaggio basette: l'incollaggio delle basette alla superficie del nodo strutturale viene realizzato con l'adesivo bicomponente X 60 (vedi fig. 4.22). Le due superfici di contatto vengono preventivamente pulite con alcool isopropilico GC-6. Per garantire un perfetto allineamento dei fori presenti sulle basette costituenti l'alloggiamento dello strumento, l'incollaggio si effettua contemporaneamente per entrambe le basette collegate fra loro mediante una barra d'acciaio;

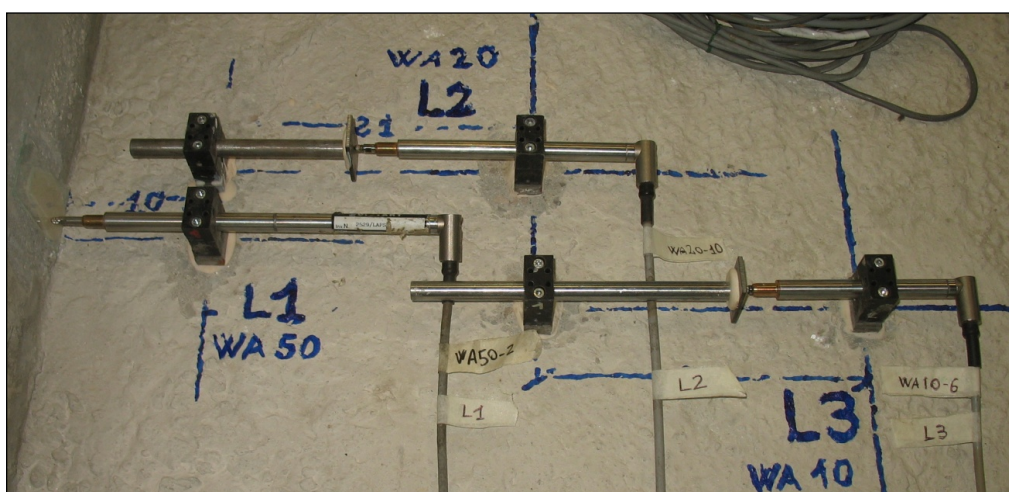


- **Figura 4.21** – Incollaggio delle basette all'estradosso della trave.



- **Figura 4.22** – Adesivo X60 – Contenitore della resina (a sinistra) e catalizzatore (a destra).

- Posizionamento dello strumento: quando la colla ha fatto presa, viene rimossa la barra necessaria per l'incollaggio (vedi fig. 4.21). Su una basetta viene ancorato lo strumento, mentre sull'altra una barra recante sulla sommità una piastra di battuta. L' ancoraggio avviene per mezzo di due viti a brugola che serrano le ganasce dei supporti, bloccando per attrito strumenti ed aste, rendendoli solidali alla superficie del getto nel punto di applicazione (vedi fig. 4.23). E' importante che gli assi dello strumento e della barra con la piastra di battuta siano allineati. Successivamente, collegati gli strumenti al sistema di acquisizione, viene effettuata la regolazione definitiva verificando in tempo reale la lettura digitale della corsa.



- Figura 4.23 – LVDT montati sull'estradosso della trave.

### 4.3 - Cella di carico

La cella di carico è uno strumento in grado di misurare lo sforzo di compressione o di trazione che grava su un generico corpo. Nella sperimentazione svolta si utilizza una cella di portata massima di 500kN prodotta dalla *AEP Trasducers*, modello TC4, montata coassialmente alla biella del sistema di spinta agente all'estremità della trave (vedi fig. 4.24). La cella di carico riportata in figura 4.25 presenta una serie di fori  $\Phi 17$  posti sulla corona esterna che consentono il serraggio, mediante bulloni, alla base inferiore a sua volta incernierata alla testa del pistone. Il foro filettato centrale (M42 a 3 mm di passo) è necessario per avvitare l'occhiello superiore d'aggancio della biella alla piastra ammorsata alla trave. Tale posizionamento della cella consente di monitorare in tempo reale l'effettivo carico assiale applicato dal pistone e, quindi, di regolarne l'intensità di conseguenza.



- **Figura 4.13** - Cella di carico inserita all'interno della biella collegata al pistone di spinta.

Risulta possibile in tal modo condurre sia cicli di carico in controllo di spostamento, con il semplice rilevamento ed inversione della spinta in prossimità degli spostamenti prefissati, sia cicli in controllo di forza, modulando ed invertendo la spinta in prossimità dei valori prefissati.

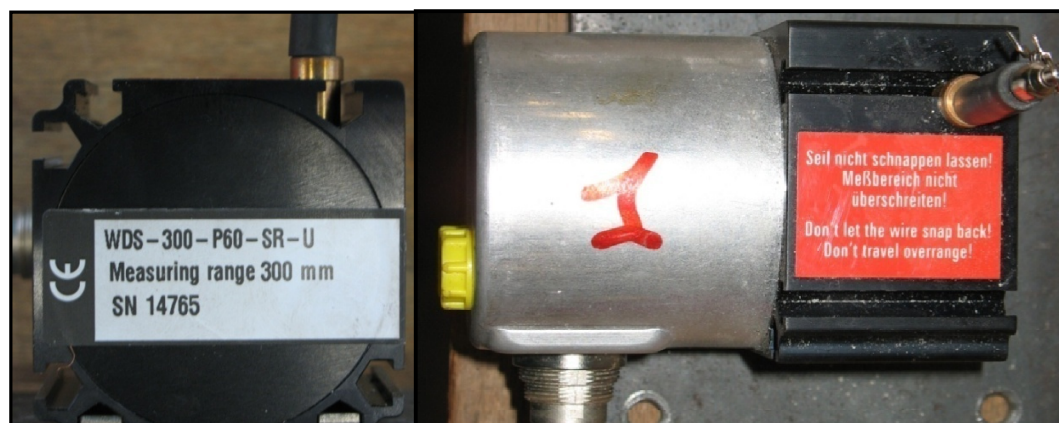


- **Figura 4.25** – Cella di carico utilizzata nella prova.

#### 4.4 - Filo estensibile



Per misurare lo spostamento assoluto all'estremità libera della trave si ricorre all'applicazione di un filo estensibile (del tipo indicato in figura 4.26) ancorato ad un'asta metallica poggiante su un profilato in acciaio appoggiato sul solaio.



- Figura 4.26 – Filo estensibile.



- Figura 4.27 – Centralina che riceve e gestisce il segnale del filo.

La bobina di filo estensibile è prodotta dalla MICRO-EPSILON, modello WDS-300-P60, ha un intervallo di misurazione di 300 mm ed è dotata all'estremità del filo di uno spillo di sicurezza munito di snodo per il fissaggio.

Il dispositivo in esame misura il movimento lineare di un oggetto per mezzo di un filo in acciaio che è ancorato all'oggetto stesso e si avvolge su un tamburo accoppiato ad un congegno in grado di trasferire, sotto forma di segnale elettrico, l'informazione sulla rotazione del tamburo ad una centralina (AL 344/5 riportata in figura 4.27).

#### 4.5 - Martinetti cavi

La precompressione del pilastro, introdotta al fine di simulare il carico trasmesso in esercizio dalle strutture sovrastanti, viene applicata mediante una coppia di martinetti cilindrici ad olio prodotti dalla ENERPAC, modello RCH-603, dotati di una portata massima di 600kN ciascuno (vedi fig. 4.28). La presenza della cavità assiale consente di porre in trazione le barre DYWIDAG  $\phi 32$  passanti dotate di piastre di contrasto.



- Figura 4.28 – Martinetti cilindrici ad olio.



- **Figura 4.29** – Trasduttore di pressione e relativo cavo che porta il segnale elettrico al sistema di controllo.

La pressione è fornita, tramite tubi armati flessibili ad attacco rapido (vedi figura 4.29), da una centralina oleodinamica elettro-attuata ENERPAC munita di manometro. Agendo manualmente mediante rubinetti risulta possibile intervenire sul circuito comune ai due pistoni per regolarne la pressione. Nella prova effettuata si è mantenuta una pressione di circuito pari a 300 bar (vedi fig. 4.30), ottenendo una risultante di spinta totale sul pilastro di 500kN.



- **Figura 4.30** – Manometro che indica la pressione di esercizio di 300kN dei martinetti durante la prova.

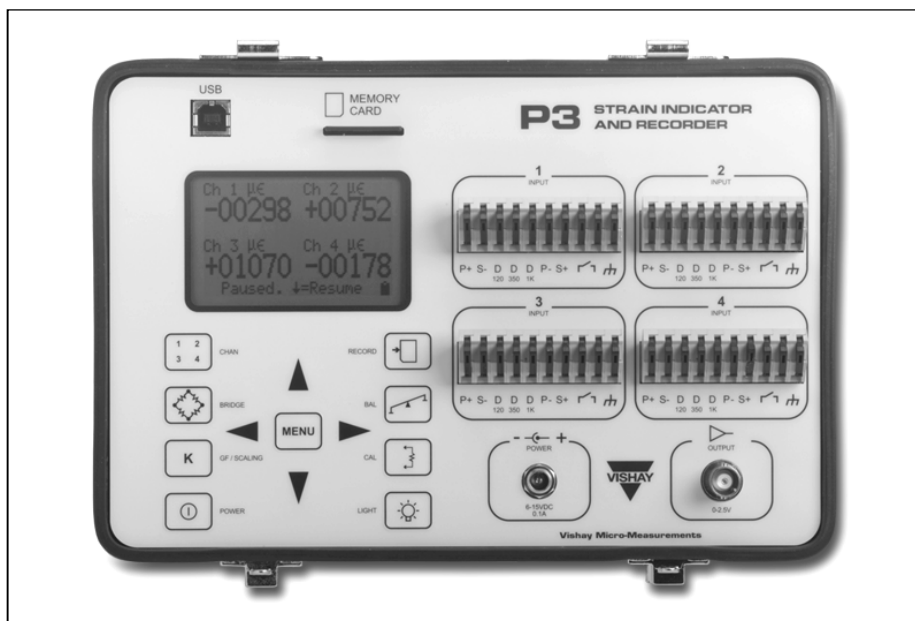
La risultante di compressione, applicata dai martinetti cavi al pilastro, sarà convertita da un trasduttore di pressione in segnale elettrico e quindi acquisita e monitorata dal sistema di controllo durante la prova. Occorre pertanto effettuare la taratura della costante di conversione del segnale elettrico in pressione, mediante l'ausilio di una pressa oleodinamica da 600KN e l'interposizione di una cella di carico.

#### 4.6 - Centralina P3 – Vishay

Si tratta di una centralina portatile alimentata a batteria, progettata dalla Vishay *Measurements Group* come indicatore di deformazioni per strumenti a funzionamento resistivo (vedi figg. 4.31-4.32). Il collegamento strumentale avviene per mezzo di una prolunga dotata di connettore femmina tipo Commital IPT (vedi fig. 4.3). Nella prova svolta la centralina è stata utilizzata come strumento di controllo della funzionalità degli estensimetri, verificandone la stabilità elettrica del collegamento.



- Figura 4.31 –Centralina Vishay Modello P3



- Figura 4.32 –Centralina Vishay Modello P3 – Vista interna.

#### 4.7 - Pistone di spinta

Il pistone che esercita il carico di prova (sia in trazione che in compressione) è un martinetto meccanico a vite prodotto dalla SETEC s.p.a., della serie europea pesante modello S.E.P. 500, da 500KN di spinta massima e da 500mm di corsa (vedi fig. 4.32). La coppia motrice è fornita tramite un motore rotativo elettrico “brush-less” prodotto dalla “Servosystem”, modello SERVOACT, di 4,08KW di potenza ed in grado di fornire una coppia massima di 78Nm. Il motore non si innesta direttamente sulla vite di comando del martinetto, ma si interpone un riduttore epicicloidale con rapporto di trasmissione pari a 24,8, prodotto dalla *Rossi Motoriduttori*, in grado di trasmettere una potenza di 6KW a 1400giri/min.

Senso e velocità di azione del martinetto sono regolati per mezzo di una centralina elettrica alimentata a 380V dalla rete industriale e collegata al motore elettrico (vedi fig. 4.33). Un sensore montato sul motore e collegato elettricamente alla centralina ha la funzione di escludere l'alimentazione in caso di raggiungimento del fine corsa del martinetto.





- Figura 4.33 –Vista del pistone di spinta e delle sue componenti principali.



- Figura 4.34 –Centralina di controllo del pistone di spinta con particolare della pulsantiera.

## Capitolo 5

### APPLICAZIONE DEGLI ESTENSIMETRI

In questo capitolo si descriverà l'applicazione degli estensimetri nel collegamento strutturale fornendo accurate informazioni riguardo la posizione scelta per ciascuno strumento.

La prova ciclica eseguita sul nodo d'angolo prevede l'utilizzo, in totale, di 16 estensimetri applicati in due differenti momenti:

- In fase di prefabbricazione 6 estensimetri vengono incollati alle gabbie di trave e pilastro inglobate nel getto prefabbricato;
- In fase di completamento i restanti 10 estensimetri vengono incollati alle gabbie di nodo ed agli spezzoni aggiuntivi inglobati nel getto integrativo.

Tutti gli estensimetri sono applicati sul lato delle barre, ovvero il piano del supporto dello strumento è parallelo al piano in cui agisce il momento flettente generato dal carico applicato.

#### 5.1 - Estensimetri nel getto di prefabbricazione

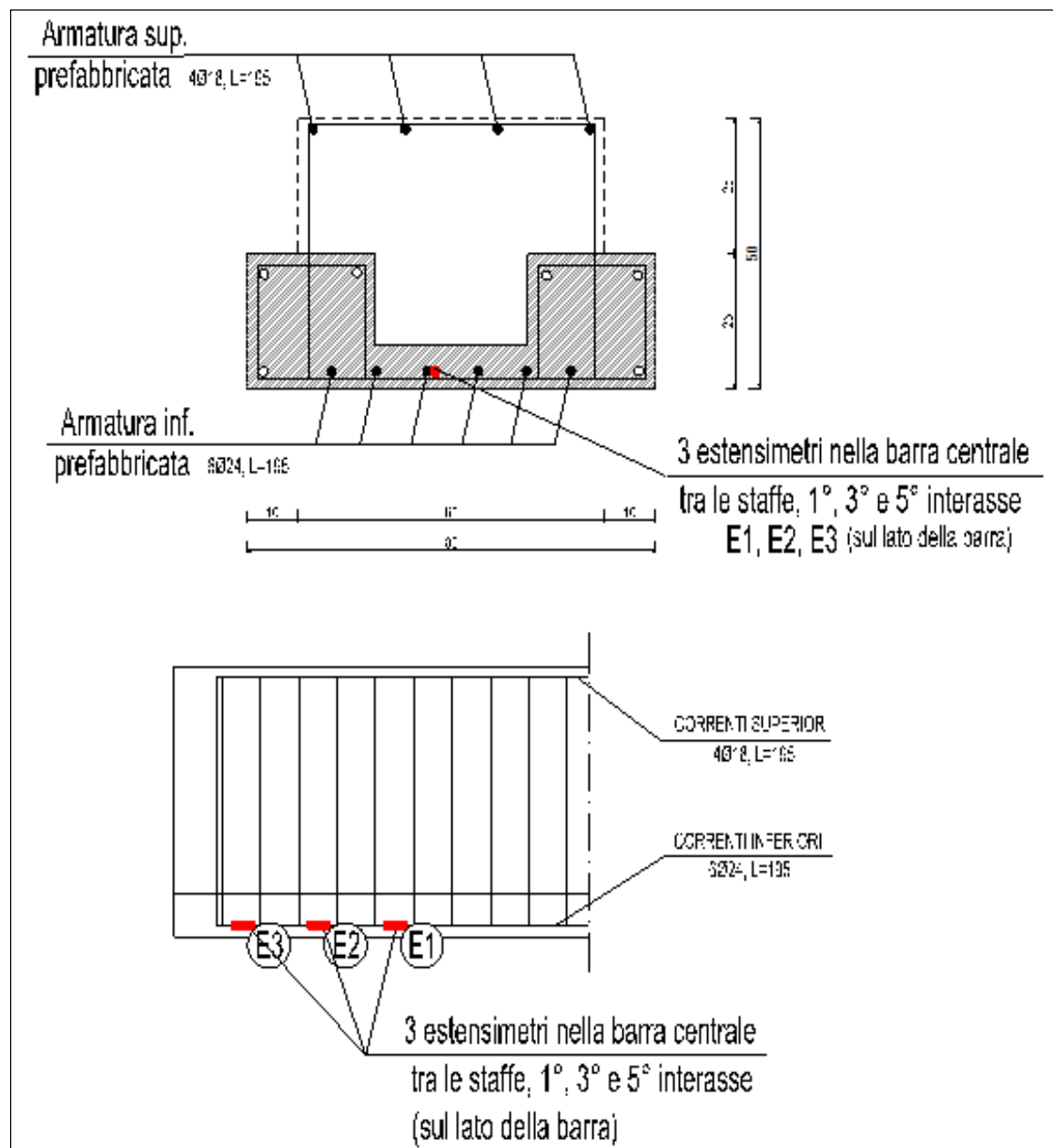
In data 15/6/2010 vengono applicati, nello stabilimento della APE s.p.a. di Montecchio (RE), gli estensimetri alle barre da annegare nel getto di prefabbricazione.

I sei estensimetri sono posizionati come segue:

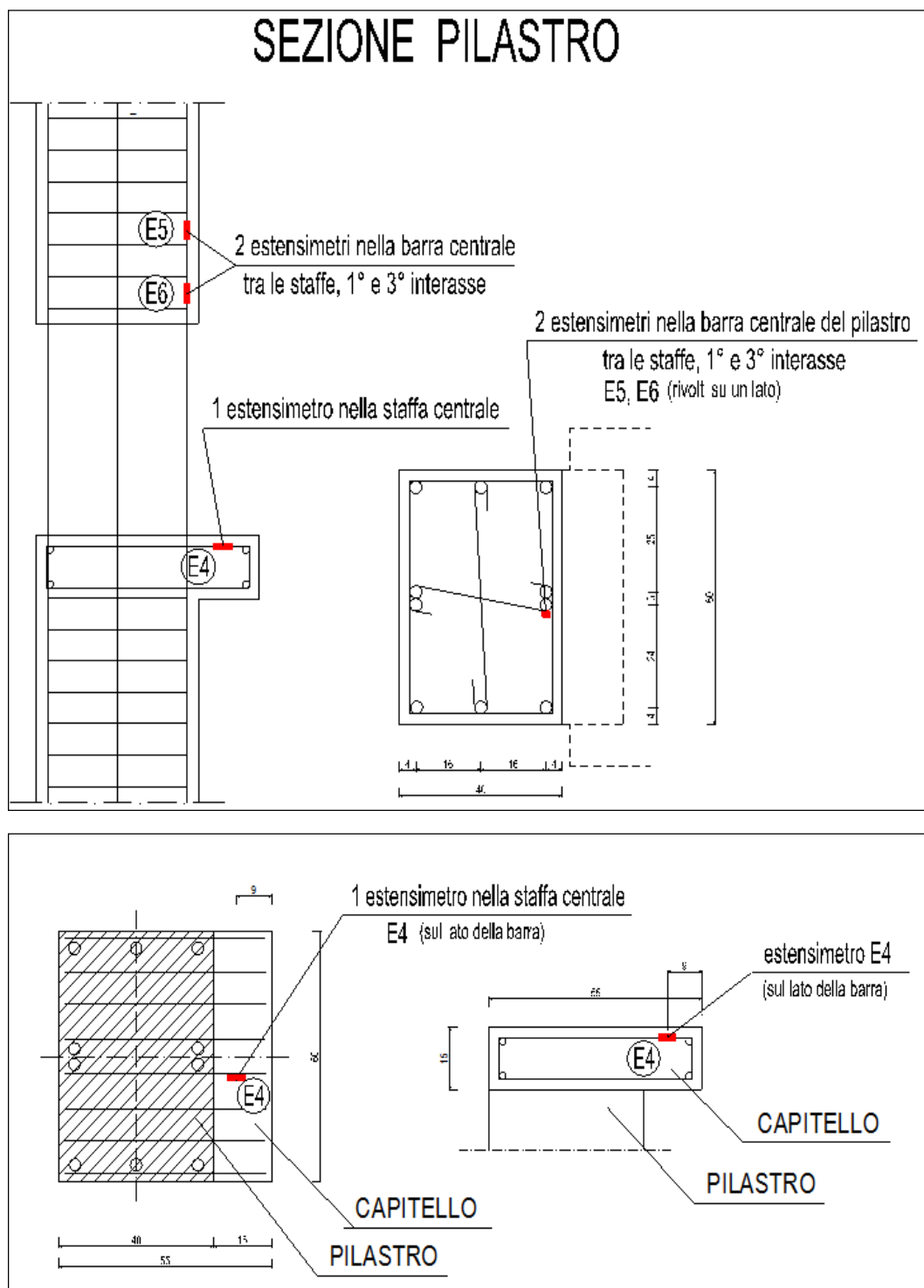
- **E1, E2, E3 : (L=6mm; k=2,10)** sono disposti all'intradosso della trave sulla barra centrale  $\phi 24$  lato Larm. Sono numerati in ordine decrescente a partire dall'estremità di innesto nel pilastro e posti all'interno degli intervalli di staffaggio 1, 3, 5 (vedi fig. 5.1 e 5.4);
- **E4 : (L=3mm; k=2,13)** è incollato sul braccio superiore della staffa centrale  $\phi 10$  lato Laps che costituisce l'armatura flessionale della mensola prefabbricata del pilastro. Si trova a 9cm a partire dal filo esterno della mensola (vedi fig. 5.2 e 5.5);
- **E5, E6 : (L=6mm; k=2,10)** sono collocati sul lato Laps delle barre longitudinali centrali  $\phi 24$  accoppiate presenti sul pilastro dalla parte dell'innesto con la trave. Sono posti all'interno degli intervalli 1 e 3 dello staffaggio a partire dalla

piastra superiore di interruzione del getto e numerati dalla sommità verso la base del pilastro (vedi fig. 5.2, 5.3).

Le figure a seguire chiariscono la corretta collocazione degli estensimetri.

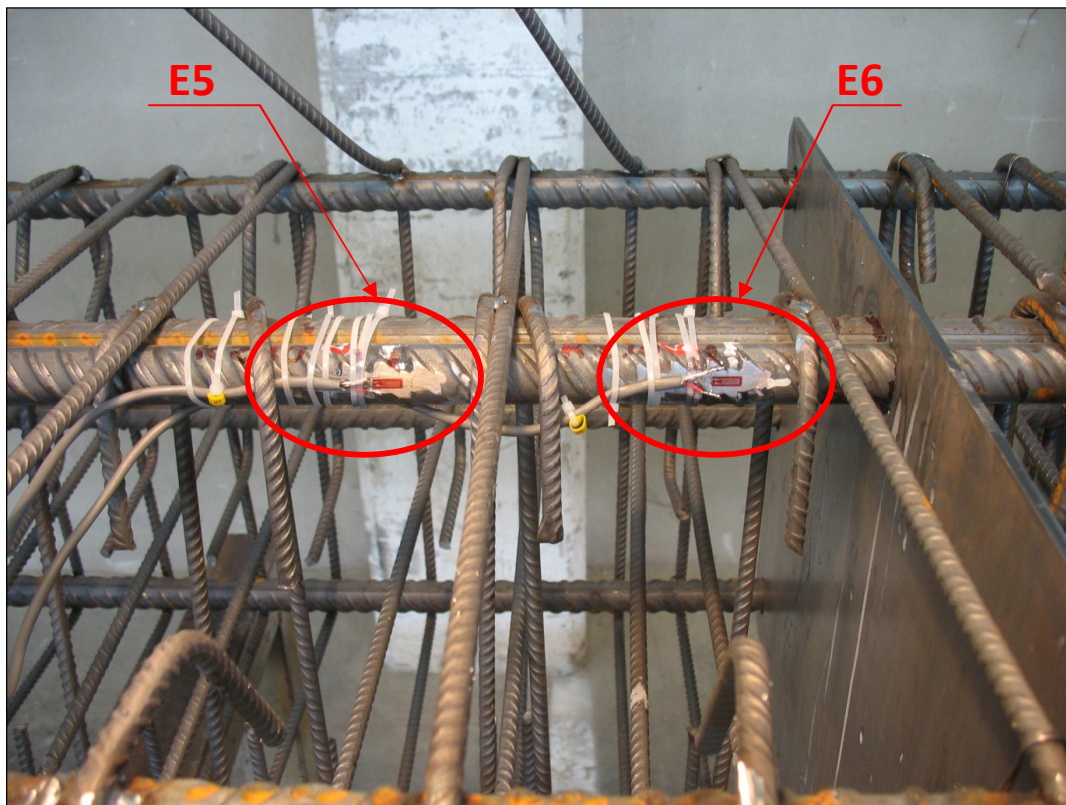


- Figura 5.1 –Schema della posizione degli estensimetri annegati nel getto prefabbricato della trave.

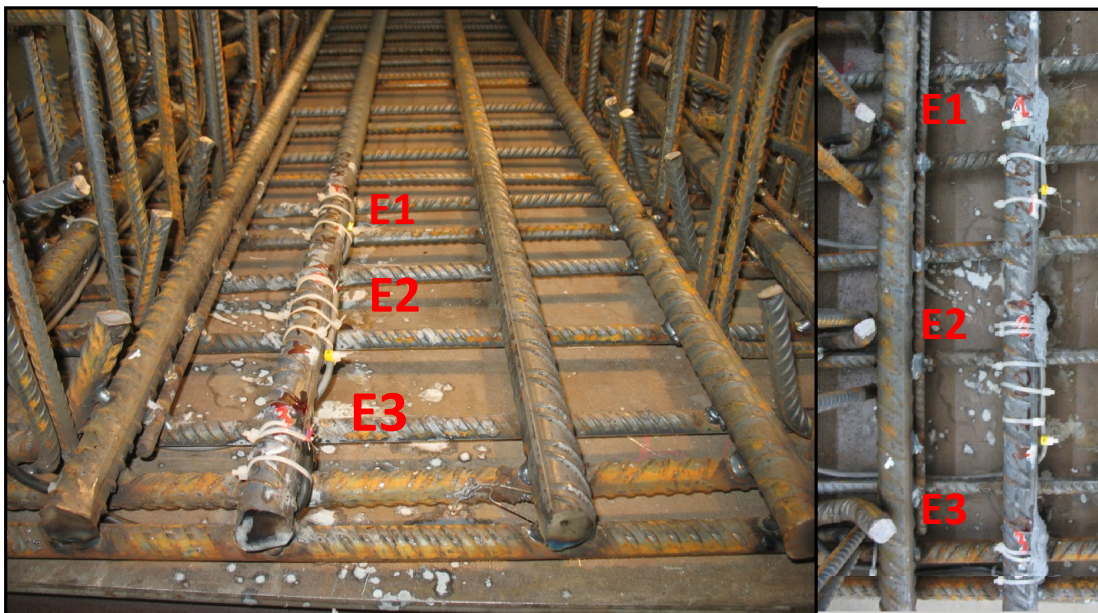


- **Figura 5.2** –Schema della posizione degli estensimetri annegati nel getto prefabbricato del pilastro.





- Figura 5.3 –Vista della posizione degli estensimetri E5, E6.



- Figura 5.4 –Vista della posizione degli estensimetri E1, E2, E3.





- Figura 5.5 –Vista della posizione dell'estensimetro E4.

## 5.2 - Estensimetri nel getto di completamento

In data 28/6/2010 la trave e il pilastro possono essere mobilitati e giungono nel Laps (Laboratorio di prove sulle strutture) dopo sette giorni di maturazione del getto di prefabbricazione. La ditta committente fornisce anche le barre integrative da annegare nel successivo getto. Dunque, con l'aggiunta di altri 10 strumenti, è possibile completare l'applicazione degli estensimetri che vengono posizionati come chiarito dalla descrizione sottostante e dalle relative figure.

- **E8, E9, E10 : (L=3mm; k=2,13)** sono disposti all'intradosso della trave sulla barra centrale  $\phi 18$  lato Laps alloggiata nella tasca di completamento della trave. Sono numerati in ordine decrescente a partire dall'estremità di innesto nel pilastro e posti all'interno degli intervalli di staffaggio 2, 5, 8 (vedi fig. 5.6, 5.10, 5.12, 5.14);
- **E12, E13, E14 : (L=6mm; k=2,10)** sono disposti all'estradosso della trave sulla barra centrale  $\phi 20$  lato Laps. Sono numerati in ordine decrescente a partire

dall'estremità di innesto nel pilastro e posti all'interno degli intervalli di staffaggio 2, 5, 8 (vedi fig. 5.6, 5.11, 5.12);

- **E11 : (L=3mm; k=2,13)** è collocato sulla barra integrativa inferiore alloggiata nella tasca di completamento della trave (dove sono incollati E8, E9, E10) a circa 17cm di distanza dagli spezzoni di  $\phi 12$  usati per incrementare l'aderenza in corrispondenza dell'uncino (vedi fig. 5.6, 5.9, 5.10);
- **E15 : (L=6mm; k=2,10)** è collocato sulla barra integrativa superiore (dove sono incollati E12, E13, E14) a circa 15cm di distanza dagli spezzoni di  $\phi 12$  usati per incrementare l'aderenza in corrispondenza dell'uncino (vedi fig. 5.6, 5.7, 5.11);
- **E18, E19 : (L=6mm; k=2,10)** sono collocati sull'armatura longitudinale centrale anteriore del pilastro (nella zona di interruzione del getto) costituita da due  $\phi 24$  accoppiati. Si trovano sul fianco Laps della barra e distano rispettivamente 24,5cm e 6cm dalla piastra superiore di contenimento del getto; all'interno del secondo e quarto intervallo di staffatura a partire dall'alto (vedi fig. 5.6, 5.15, 5.16, 5.17).

Lo schema in figura 5.6, chiarisce la corretta collocazione degli estensimetri; mentre le immagini forniscono una reale testimonianza delle operazioni eseguite.

#### Osservazione

Rispetto allo schema iniziale giunto in laboratorio recante gli estensimetri da incollare, viene tralasciata l'applicazione degli strumenti sulle staffe di nodo (indicati come E16 e E17) per mancanza di tempo. Inoltre, per una disattenzione, l'estensimetro che su carta viene indicato come E7 risulta nella pratica battezzato E19 (in tutte le operazioni successive viene mantenuto questo nome).

## SEZIONE NODO PILASTRO-TRAVERTE

2 estensimetri nella barra centrale  
tra le staffe, 1° e 3° interasse



2 estensimetri nella barra centrale del nodo

- **Figura 5.6** –Schema della posizione degli estensimetri annegati nel getto di completamento del nodo.



- **Figura 5.7** –Schema Estensimetro E15 posizionato vicino all’uncino di ancoraggio della barra superiore.

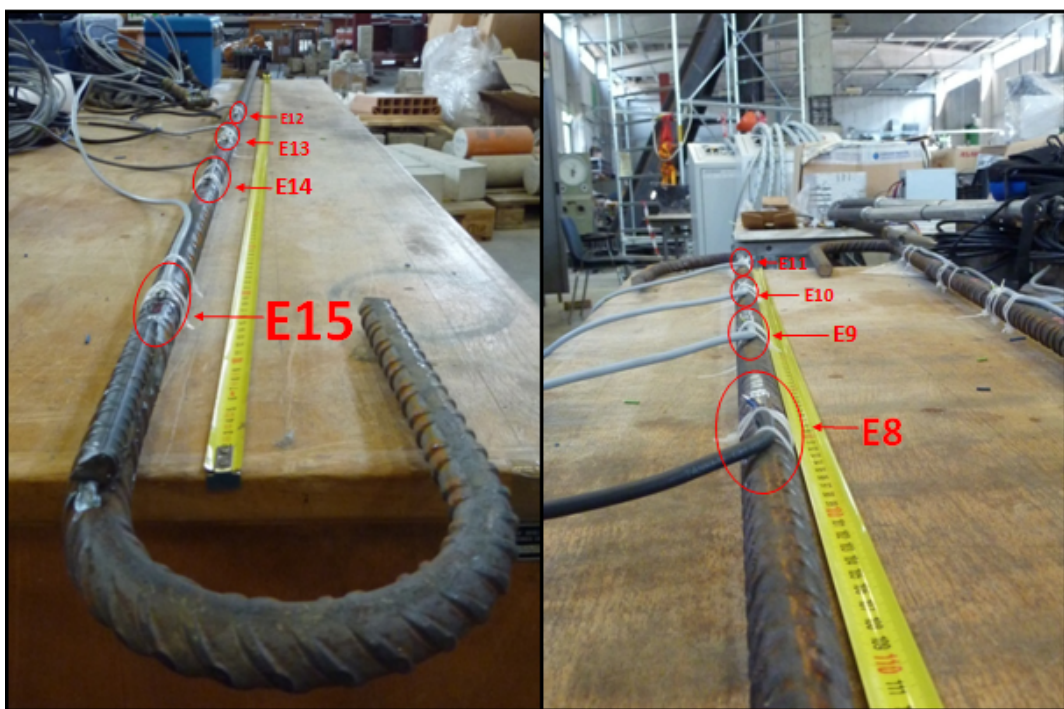


- **Figura 5.8** –Ancoraggio del cavo di acquisizione del segnale mediante fascette.

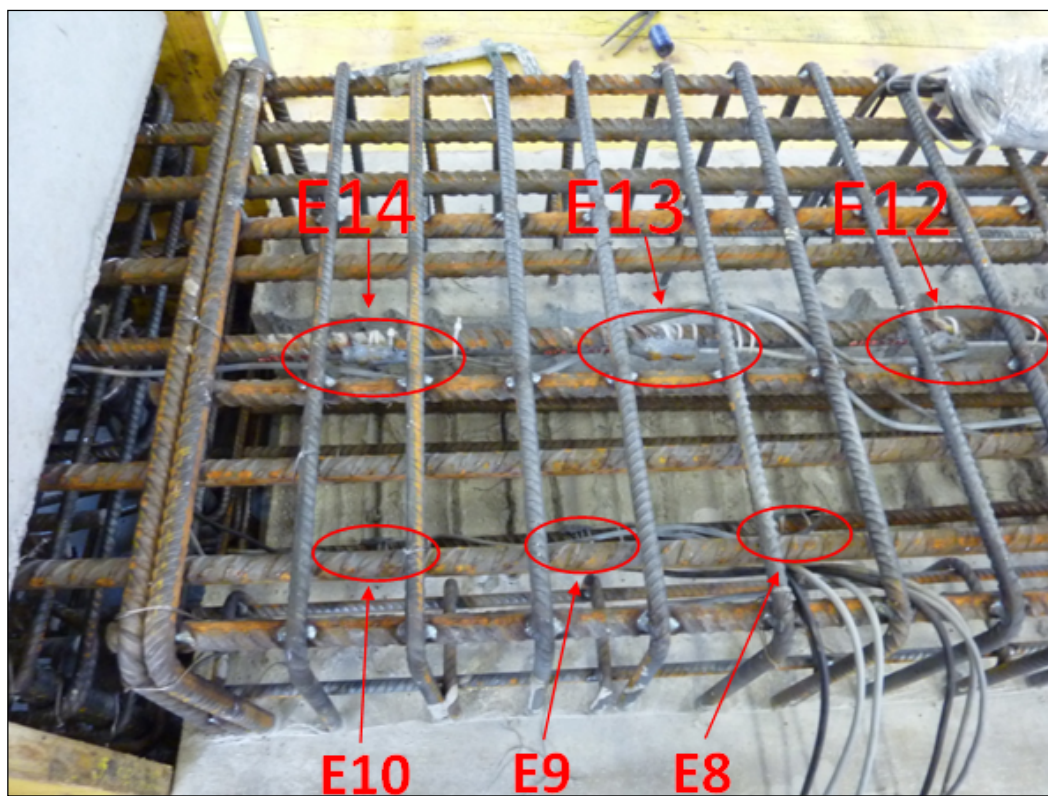


- **Figura 5.9** –Vista dell’estensimetro E11 posizionato sulla barra integrativa d’intradosso.





- **Figura 5.10** –Disposizione degli estensimetri sugli spezzoni integrativi d’estradosso (a sinistra) e d’intradosso (a destra).

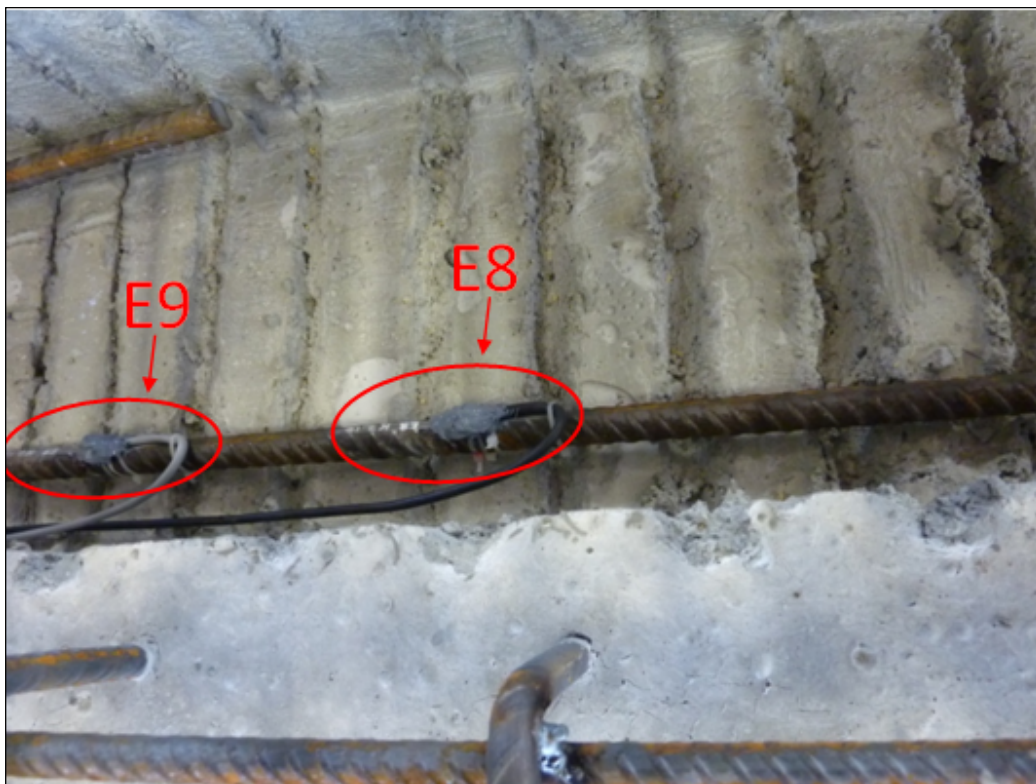


- **Figura 5.11** – Vista delle barre integrative strumentate e inserite nella gabbia prima del getto di completamento.





- Figura 5.12 – Vista dello spezzone integrativo superiore prima del getto.



- Figura 5.13 – Vista dello spezzone integrativo inferiore in fase di alloggiamento nella tasca della trave.



- **Figura 5.14** – Posizionamento dell'estensimetro E18 mediante nastro PCT-A



- **Figura 5.15** – Vista degli estensimetri E18 ed E19 posizionati all'interno del nodo.

## Capitolo 6



# APPLICAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DI SUPERFICIE

## 6.1 - Generalità

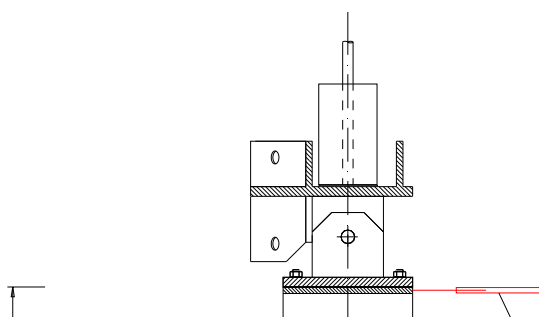
La prova in esame richiede il rilievo strumentale degli spostamenti, relativi ed assoluti, di prestabiliti riferimenti superficiali.

Pertanto, per monitorare il comportamento strutturale del nodo, è necessario applicare degli strumenti che forniscano la misura dello spostamento in continuo con la variazione del carico.

In particolare vengono misurati:

1. Due spostamenti assoluti (paragrafo 6.3):
  - Spostamento verticale dell'estremità libera della trave: viene rilevato attraverso un filo metallico estensibile (descritto nei paragrafi 4.4 e 6.3.1) collegato ad un dispositivo in grado di trasmettere i dati alla centralina di controllo;
  - Spostamento della sommità del pilastro: viene rilevato attraverso un LVDT WA50 ancorato ad un profilato in acciaio a sua volta fissato al ponteggio (paragrafo 6.3.2);
2. Dieci spostamenti relativi (paragrafo 6.2):
  - Contrazione/dilatazione di tre "conci" all'estradosso della trave: rilevata da tre LVDT disposti in serie all'estradosso della trave;
  - Contrazione/dilatazione di tre "conci" all'intradosso della trave: rilevata da cinque LVDT disposti in serie all'intradosso della trave;
  - Contrazione/dilatazione delle diagonali del nodo: rilevata attraverso due LVDT disposti sulle diagonali del nodo.

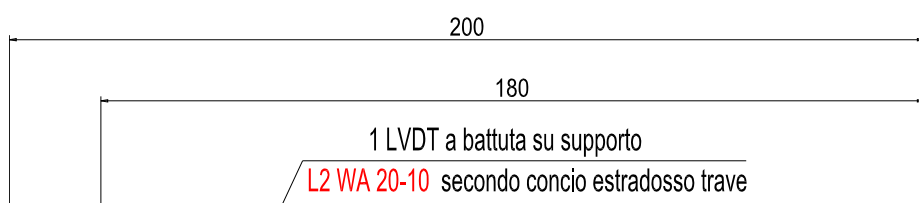
Di seguito viene riportata la rappresentazione schematica del nodo pilastro-trave con la strumentazione di superficie utilizzata (fig. 6.1 e 6.2).



SEZIONE NODO  
PILASTRO - TRAVE

- **Figura 6.1** – Schematizzazione del posizionamento della strumentazione di superficie.

## TRAVE: vista ESTRADOSSO



- **Figura 6.2** – Schematizzazione della strumentazione di superficie sulla trave.

## **6.2 - Posizionamento dei trasduttori induttivi di spostamento (LVDT) per misurare spostamenti relativi**



Allo scopo di posizionare in maniera ottimale la strumentazione di superficie, ci si avvale della precedente sperimentazione sul nodo a tre vie per fare una previsione sull'entità degli spostamenti relativi e sulla posizione e la dimensione delle fessure che verranno a crearsi in prossimità dei carichi limite di prova. In questo modo diventa possibile posizionare gli induttivi nella dimensione, nella regolazione della corsa iniziale (valore dell'escursione strumentale iniziale a carico e spostamento nullo) e nel passo corretto in modo da focalizzare l'attenzione sul punto in cui effettivamente si ha il campo fessurativo più importante.

Per quanto riguarda la trave, è stata idealmente divisa in tre conci (porzioni di trave comprese tra due sezioni trasversali) individuati a partire dall'innesto col pilastro (vedi fig. 6.1); rispettivamente di lunghezza pari a 10cm, 21cm, 21cm. Gli induttivi applicati alla trave vanno a presidiare le sezioni di estremità dei tre conci consecutivi, sia all'estradosso che all'intradosso della trave.

Ne deriva che dagli spostamenti relativi registrati al variare del carico, risulta possibile risalire, in fase di elaborazione dei dati, alle deformazioni medie dei conci, e quindi ai valori di curvatura media. Si dispone in tal modo del diagramma momento-curvatura di tali conci, da affiancare al diagramma forza-spostamento, tracciabile grazie all'applicazione del filo estensibile all'estremità libera della trave.

Nella sperimentazione sul nodo a tre vie condotta nell'inverno 2009 i conci individuati erano due (il primo di 20cm e il secondo di 15cm). Questa volta il primo concio viene fortemente ristretto (10cm) con l'intento di focalizzare la misura di spostamento in corrispondenza del cuneo di distacco che si era formato nella prova precedente e che si presume si presenti anche nel test attuale. Essendo dunque il primo concio molto contratto, risulta necessario introdurre altri due conci per estendere la misura fino a dove ci si aspetta che la deformazione sia significativa.

Per quanto riguarda il pilastro, vengono applicati due induttivi sulle diagonali di nodo.

Nello sviluppo di questo e dei prossimi capitoli, gli induttivi vengono indicati con una sigla analoga alla seguente: WA 50-2. Il primo numero che compare per identificare l'induttivo ne indica la corsa in millimetri, mentre il secondo rappresenta un codice identificativo dello strumento che lo lega univocamente ad una costante di conversione del segnale (indicata al paragrafo 4.2 nella tabella 4.1).

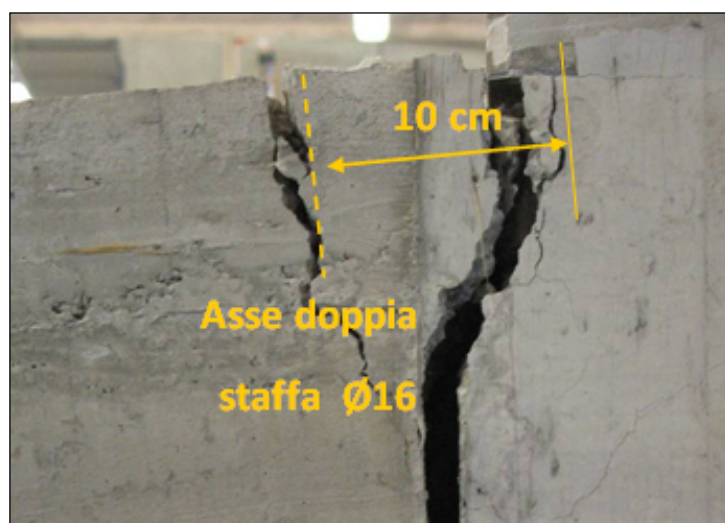
Il numero, il tipo e la disposizione degli induttivi a riferimento relativo dettati dalle considerazioni precedentemente esposte sono descritti di seguito:

- **L1 – Primo concio all’estradosso della trave – WA 50-2**

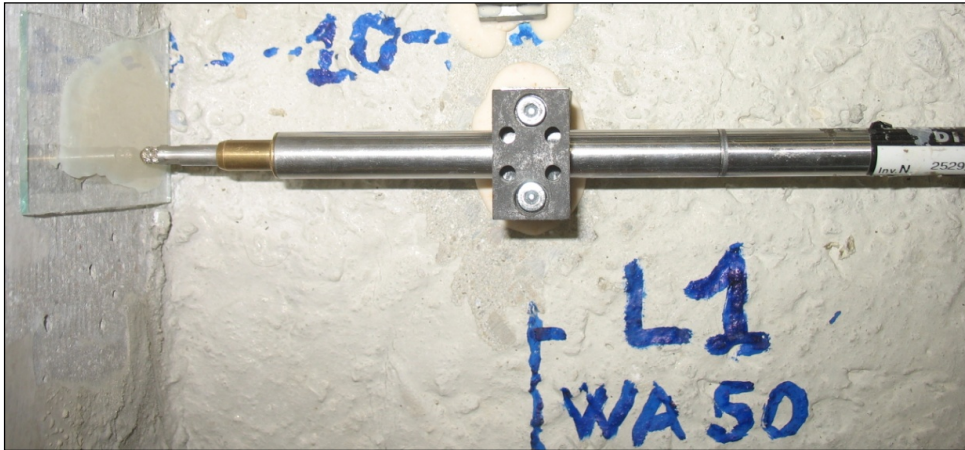
**Distanza tra basette: 10cm – Precarico: 3cm**

**Modalità di fissaggio: Adesivo bicomponente X 60**

E’ posto all’estradosso della trave e centrato rispetto alla sua larghezza. La sonda dello strumento è in battuta su una piastra incollata sul pilastro (vedi fig. 6.4, 6.7). Viene prescritta una base di misura pari a 10cm in considerazione del fatto che, durante la precedente sperimentazione su un nodo a tre vie, era emerso un quadro fessurativo che comprendeva un cuneo di distacco all’innesto superiore della trave largo circa 10cm (vedi fig.6.3). La base di misura piccola permette di cogliere l’effetto locale dato dalla fessurazione a cuneo. La regolazione della corsa iniziale con 3cm di precarico è dovuta al fatto che si prevede una deformazione della trave preponderante verso il basso;



- **Figura 6.3** – Fessurazioni che formano un cuneo di distacco in corrispondenza dell’innesto superiore della trave durante la prova dell’inverno 2009.



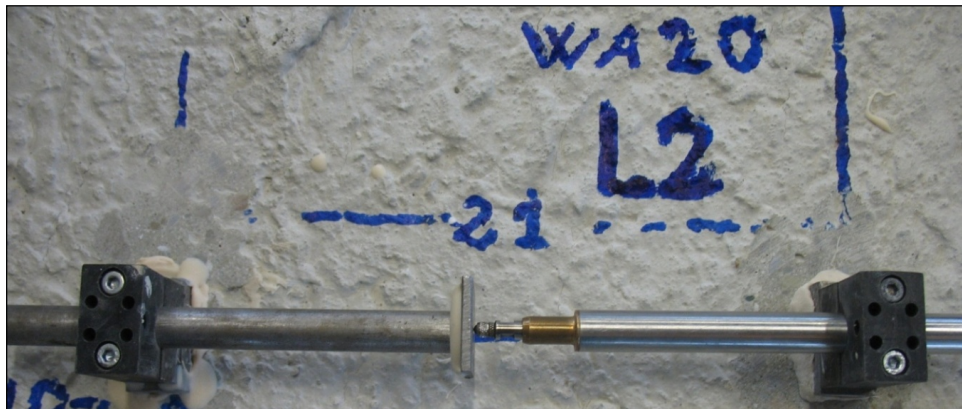
- **Figura 6.4** – Vista dell'induttivo L1 (primo concio estradosso).

- **L2 – Secondo concio all'estradosso della trave – WA 20-10**

**Distanza tra basette: 21cm**

**Modalità di fissaggio: Adesivo bicomponente X 60**

E' posto all'estradosso della trave e si discosta di 5cm (lato Larm) dall' asse della trave (vedi fig. 6.5, 6.7). Viene adottato un induttivo dalla corsa totale pari a 2cm poiché, già al secondo concio, le deformazioni sono molto attenuate, pur essendo la base di misura maggiore rispetto al primo concio;



- **Figura 6.5** – Vista dell'induttivo L2 (secondo concio estradosso).

- **L3 – Terzo concio all'estradosso della trave – WA 10-6**

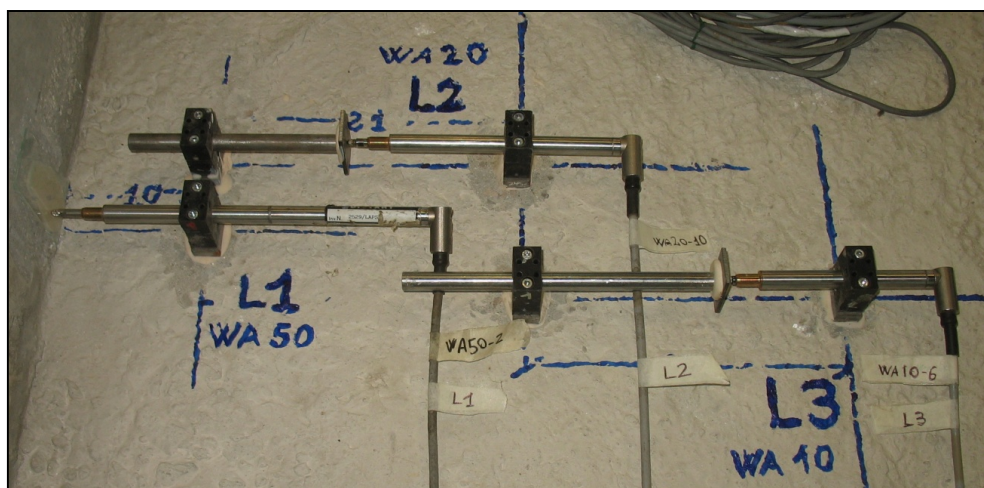
**Distanza tra basette: 21cm**

**Modalità di fissaggio: Adesivo bicomponente X 60**

E' posto all'estradosso della trave e si discosta di 5cm (lato Laps) dall' asse della trave (vedi fig. 6.6, 6.7). Viene adottato un induttivo dalla corsa totale pari a 1cm poiché, nel terzo concio, le deformazioni sono modeste;



- Figura 6.6 – Vista dell'induttivo L3 (terzo concio estradosso).



- Figura 6.7 – Vista complessiva degli induttivi all'estradosso della trave.

- **L4, L6 – Primo concio all'intradosso della trave – WA 50-1, WA 50-3**

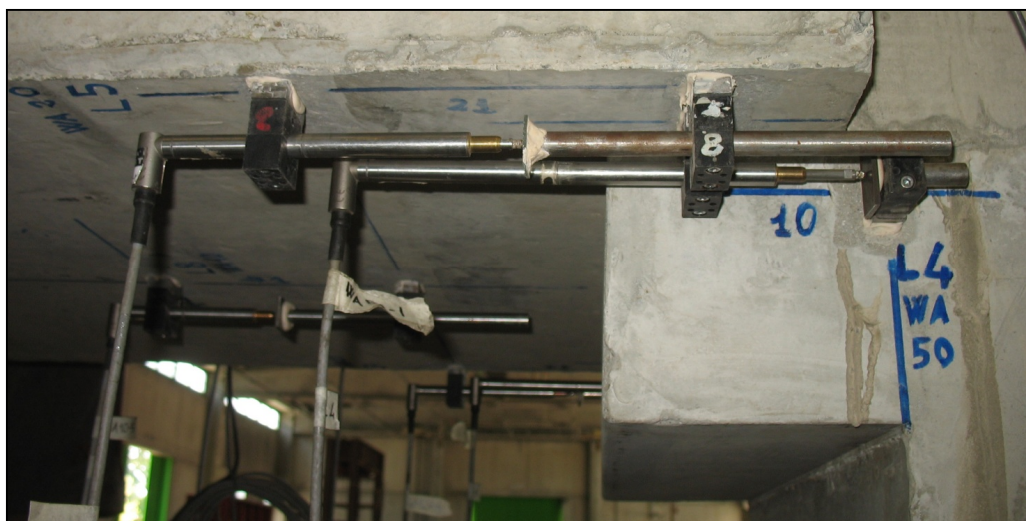
**Distanza tra basette: 10cm – Precarico: 1cm**

**Modalità di fissaggio: Adesivo bicomponente X 60**

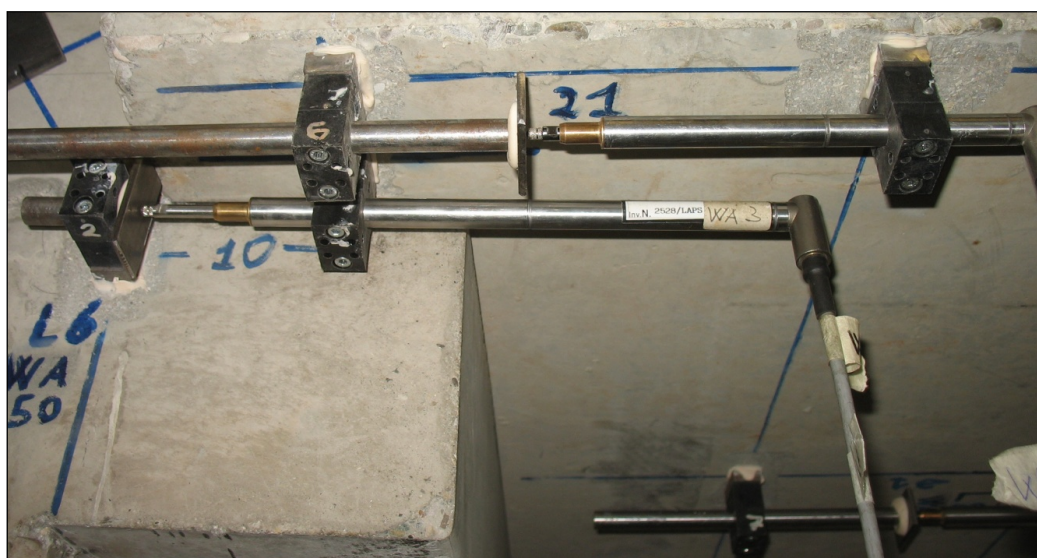
Sono posti all'intradosso della trave sotto le ali di appoggio per i pannelli di solaio (L4 lato LARM; L6 lato LAPS). Una delle basette è incollata al pilastro in modo che il suo asse coincida col filo esterno del pilastro (vedi fig. 6.8, 6.9, 6.11). Poiché si trovano al primo concio, la base di misura è 10cm, coerentemente con quella usata per l'induttivo superiore L1. Vengono usati strumenti con una corsa di 5cm perché è in corrispondenza dell'innesto col pilastro che si concentrano le



fessure; questa volta però la sonda viene precaricata solo di 1cm perché ci si aspetta una preponderante deformazione della trave verso il basso;



- Figura 6.8 – Vista degli induttivi L4 e L5 (primo e secondo concio lato LARM).



- Figura 6.9 – Vista degli induttivi L6 e L7 (primo e secondo concio lato LAPS).

- **L5, L7 – Secondo concio all'intradosso della trave – WA 20-6, WA 20-7**

**Distanza tra basette: 21cm**

**Modalità di fissaggio: Adesivo bicomponente X 60**

Sono posti all'intradosso della trave sotto le ali di appoggio per i pannelli di solaio (L4 lato LARM; L6 lato LAPS) (vedi fig. 6.8, 6.9, 6.11). Poiché si trovano al secondo concio, la base di misura è 21cm, coerentemente con quella usata per



l'induttivo superiore L2. Vengono usati strumenti con una corsa di 2cm poiché, già al secondo concio, le deformazioni sono molto attenuate rispetto al primo, pur essendo la base di misura maggiore;

- **L8 – Terzo concio all'intradosso della trave – WA 10-5**

**Distanza tra basette: 21cm**

**Modalità di fissaggio: Adesivo bicomponente X 60**

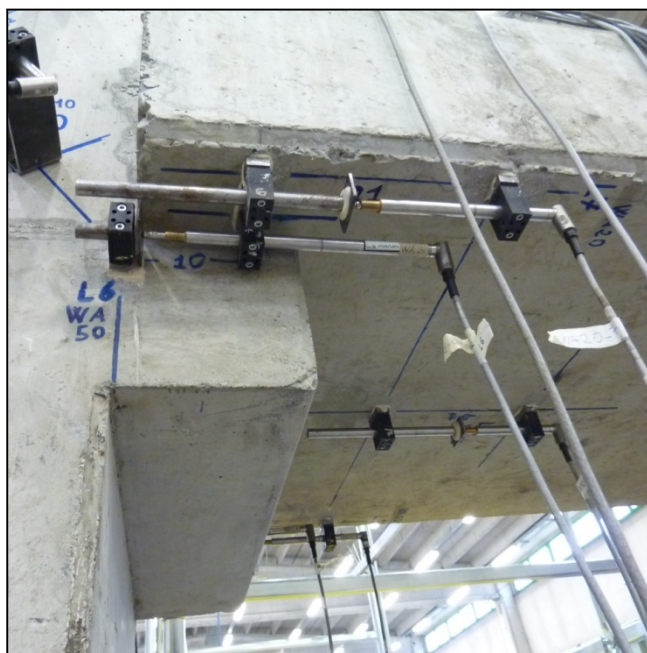
E' posto all'intradosso della trave e centrato rispetto alla sua larghezza (vedi fig. 6.10, 6.11). La base di misura di 21cm è coerente con quella usata nel terzo concio all'estradosso. Viene usato uno strumento con una corsa di 1cm poiché nel terzo concio le deformazioni sono modeste;



- Figura 6.10 – Vista dell'induttivo L8 (terzo concio intradosso)



- Figura 6.11a – Vista complessiva degli induttivi posti all'intradosso della trave.



- **Figura 6.11b** – Vista complessiva degli induttivi posti all'intradosso della trave.

- **L9, L10 – Diagonali nodo – WA 10-2, WA 10-1**

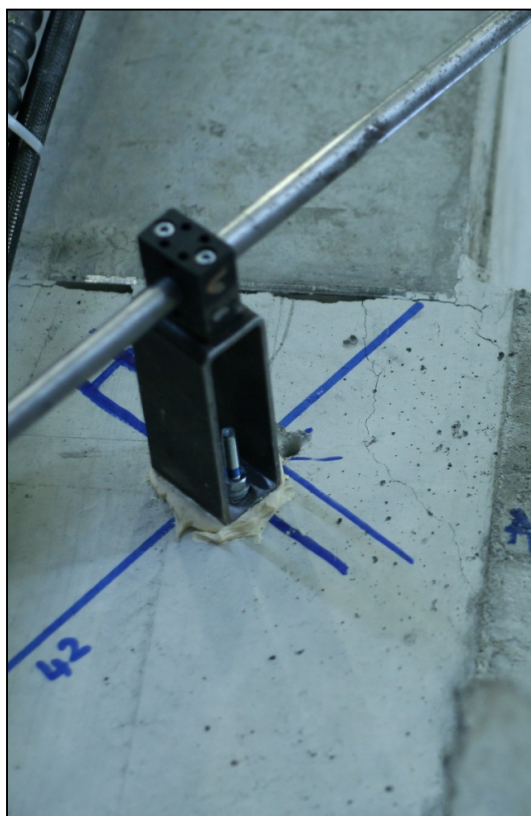
**Distanza tra basette: 42cm**

**Modalità di fissaggio: Tasselli ad espansione e adesivo bicomponente X 60**

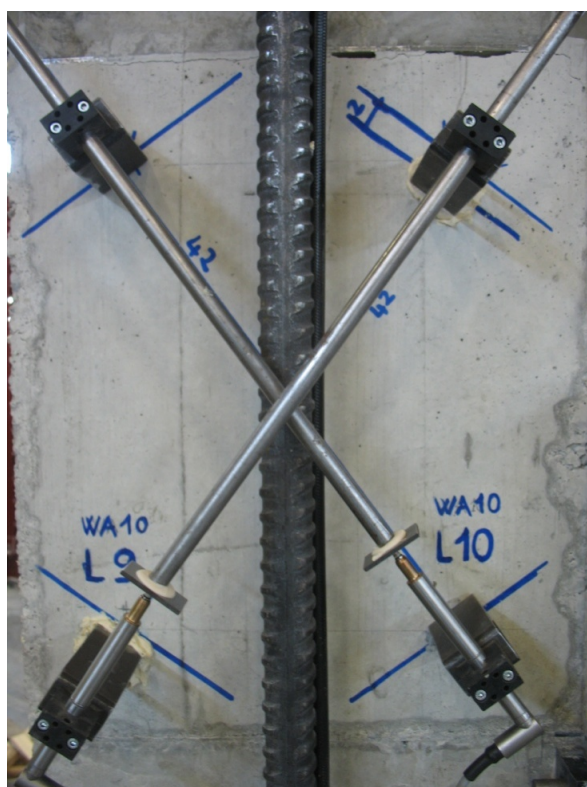
Per il fissaggio della strumentazione del pannello di nodo si preferisce ricorrere all'utilizzo di otto tasselli ad espansione M6, onde evitare il rischio che lo stato fessurativo indotto dalle sollecitazioni di nodo determini il distacco degli incollaggi superficiali in fase di rilevamento. In seguito ad alcuni problemi nel serraggio dei tasselli del trasduttore induttivo L9 si è utilizzato in aggiunta l'adesivo bicomponente X 60 (vedi fig.6.12).

Poiché la lunghezza d'ancoraggio dei tasselli risulta superiore al copriferro, occorre individuare la più agevole disposizione dei fori in modo tale che ricadano in zone prive d'acciaio, garantendo comunque l'allineamento dei supporti sulle diagonali.

I supporti della strumentazione di nodo richiedono l'applicazione di quattro profilati di prolungamento, aventi lunghezze a due a due differenti, al fine di consentire la disposizione incrociata degli induttivi e di garantire un interasse di circa 10cm tra le aste di battuta e la superficie di nodo, sufficiente a garantire il passaggio delle barre DYWIDAG, predisposte al fine di applicare la compressione assiale del pilastro (vedi fig. 6.13).



- **Figura 6.12** – Particolare della doppia modalità di incollaggio (tassello ad espansione ed adesivo) usato per gli induttivi L9 ed L10.



- **Figura 6.13** – Vista degli induttivi L9 ed L10 applicati alle diagonali del nodo.

### **6.3 - Applicazione degli strumenti a riferimento assoluto**

Per completare il sistema di rilevamento degli spostamenti dell'opera prestabilito occorre installare la bobina di filo estensibile, agganciando il capo del filo all'occhiello predisposto all'estremità della trave, e posizionare l'induttivo L11 WA 50-4 che andrà a battuta sulla sommità del pilastro. Questi due strumenti, a differenza dei precedenti, consentono di rilevare componenti di spostamento assolute in determinate zone dell'opera, poiché fissati a supporti solidali col solaio del laboratorio.

La rilevazione dello spostamento che l'estremità della trave subisce al variare del carico di prova è un dato importante perché consente di quantificare la rotazione indotta dalla deformazione del complesso nodo-trave. Poiché l'applicazione del carico induce inevitabili cedimenti della struttura di contrasto, e quindi una rotazione rigida del complesso trave-pilastro, anche l'estremità della trave subirà spostamenti rigidi che vanno ad "inquinare" la lettura del filo. L'applicazione dell'induttivo L11 WA 50-4 serve a rilevare lo spostamento della sommità del pilastro ed a ricavare quindi, mediante semplice proporzione, lo spostamento rigido dell'estremità della trave. Risulta chiaro quindi che l'utilizzo abbinato dei due strumenti consente di risalire al valore di spostamento d'estremità della trave al netto delle rotazioni rigide.

#### **6.3.1 - Posizionamento del trasduttore di spostamento a filo**

Viene fissato il tassello ad espansione M4 munito di occhiello sul baricentro della sezione di estremità della trave. La bobina di filo estensibile, munita di una base d'appoggio, viene serrata mediante quattro viti ad una piastra di supporto che gli permette di essere disposta sulla verticale passante per l'occhiello. La piastra a sbalzo è a sua volta saldata alla sommità di un profilato d'acciaio posato stabilmente sul piano di calpestio del laboratorio (vedi fig. 6.14).

L'informazione sulla rotazione della bobina di filo ad opera dello spostamento dell'estremità della trave, viene trasmesso attraverso un cavo alla centralina AL 344/5 (vedi fig. 4.27).





- **Figura 6.14** – Vista della piastra di supporto cui è fissata la bobina di filo estensibile e dell’ancoraggio per mezzo di un tassello ad espansione M4 munito di occhiello.

### **6.3.2 - Posizionamento del trasduttore induttivo di spostamento L11 sulla sommità del pilastro**

#### **L11 – Sommità del pilastro – WA 50-4**

**Modalità di fissaggio: meccanico attraverso un’asta di sostegno.**

Il punto di battuta dell’induttivo L11 viene fissato in corrispondenza del centro della piastra di interruzione del getto posta sulla sommità del pilastro, posto a 430 cm di altezza dal piano di calpestio (vedi fig.6.16). Il sistema di supporto è composto da una prolunga di sostegno fissata, per mezzo di morsetto a vite, al montante del ponteggio in dotazione al laboratorio. La prolunga di sostegno è composta da un’asta con supporto a morsetto innestata in una piastra saldata all’estremità di un profilato tubolare in acciaio



ammorsato al ponteggio (vedi fig.6.15). Onde evitare accidentali spostamenti in corso di rilevazione, il ponteggio viene sospeso sugli appositi appoggi a vite.



- Figura 6.15 – Vista dell'induttivo L11 posto sulla sommità del pilastro e dotato di prolunga ammorso al ponteggio.



- Figura 6.16 – Particolare della battuta sulla piastra di interruzione del getto posta in sommità.

## **Capitolo 7**

# SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI

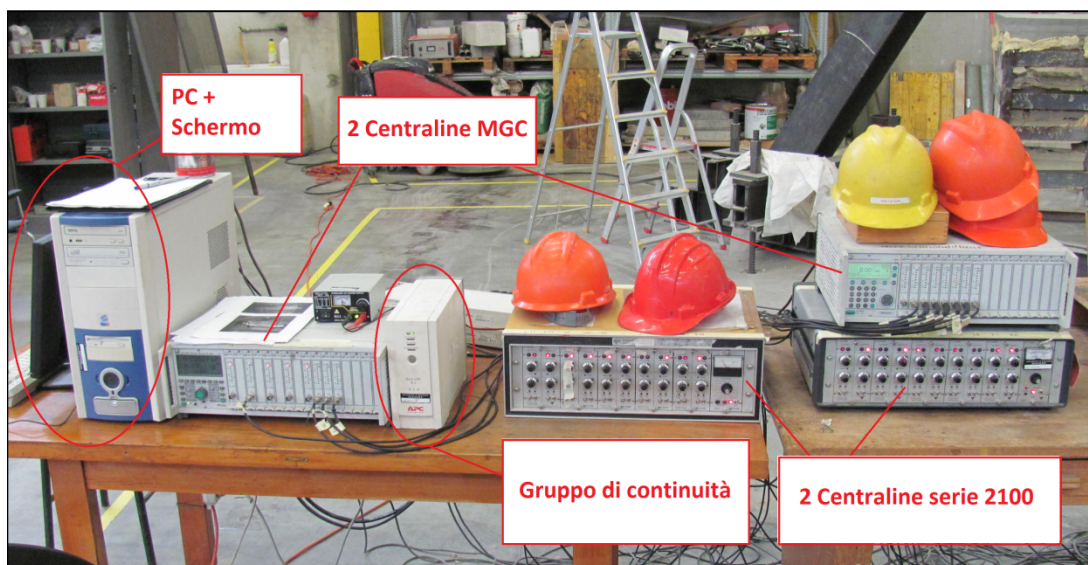
In questo capitolo viene descritto il sistema di acquisizione dati, grazie al quale il segnale degli strumenti viene rilevato e convertito in una misura fisicamente significativa. Successivamente tale misura viene registrata in un file dati di output con una prefissata frequenza. Nel paragrafo 7.2 vengono descritte tutte le apparecchiature dedicate all'acquisizione ed alla tutela della continuità del segnale elettrico proveniente dagli strumenti di misura, elencandone le caratteristiche distintive e descrivendone le modalità di settaggio. Il paragrafo 7.3 si occupa, invece, del software di acquisizione, descrivendo l'ambiente di sviluppo in cui è stato compilato (LabVIEW) e i dettagli costitutivi dei programmi (ovvero sottoprogrammi) realizzabili in LabVIEW, denominati strumenti virtuali (V.I.).

## 7.1 – Generalità

Gli strumenti installati a monitoraggio di forze, deformazioni e spostamenti applicati al nodo strutturale risulteranno nel complesso **30**: **1** cella di carico, **1** filo estendibile, **1** coppia di martinetti cavi, **16** estensimetri e **11** LVDT. Si è reso necessario quindi lo sviluppo di un sistema in grado di alimentare tali strumenti, condizionarne il segnale elettrico acquisito e registrare i dati ottenuti dalle opportune conversioni di tali segnali in grandezze fisiche.

La prova di caricamento ciclico in esame, di tipo istantaneo, prevede una frequenza di rilevazione delle letture molto elevata, per questo motivo il sistema di acquisizione dei dati deve risultare totalmente automatizzato. L'acquisizione dei dati avviene tramite la gestione di un software appositamente programmato, limitando l'intervento manuale alla sola regolazione dei parametri di acquisizione.

L'insieme delle apparecchiature necessarie a realizzare l'intero sistema di acquisizione è rappresentato, nelle viste frontale e posteriore, dalle figure 7.1 e 7.2; si può notare nell'immagine 7.2, il notevole numero di cavi (e quindi strumenti) collegati in input alle centraline, e mostra inoltre come i segnali rilevati siano poi fisicamente convertiti in due soli ingressi al PC di acquisizione.



- **Figura 7.1** - Sistema di acquisizione: vista frontale.



- **Figura 7.2** - Sistema di acquisizione: vista posteriore.

## 7.2 - Apparecchiature di acquisizione dei segnali

### 7.2.1 - VISHAY Signal Conditioning Amplifier 2100



Si tratta di una centralina analogica multi-canale (al massimo 10), prodotta dalla **VISHAY Measurements group**, in grado di condizionare ed amplificare il segnale di strumenti a funzionamento esclusivamente resistivo (fig. 7.3).



- **Figura 7.3** – VISHAY Signal Conditioning Amplifier 2100.

Nella prova in esame sono state utilizzate due centraline della serie 2100 ma di differente modello :

1. Centralina con *modulo di alimentazione* modello **2110A** e *10 canali di acquisizione*, suddivisi in: *4 moduli di amplificazione* modello **2120A**, a 2 canali di acquisizione ciascuno; *1 moduli di amplificazione* modello **2120B**, a 2 canali di acquisizione (fig. 7.4);
2. Centralina con *modulo di alimentazione* modello **2110B** e *10 canali di acquisizione*, suddivisi in *4 moduli di amplificazione* modello **2120B**, a 2 canali di acquisizione ciascuno (fig. 7.5).





- Figura 7.4 - Vista frontale e posteriore della centralina 2110A.



- Figura 7.5 - Vista frontale e posteriore della centralina 2110B.

I *moduli di alimentazione* sono muniti di un interruttore di alimentazione dell'intera centralina e di un sistema di monitoraggio delle tensioni presenti su ciascun canale alimentato, costituito da una manopola di selezione del circuito monitorato e da un voltmetro analogico che ne fornisce la tensione (con scala da 0 a 12 Volt). La manopola ha 12 selezioni possibili: una per monitorare l'eccitazione al ponte in ognuno dei 10 canali disponibili (selezioni 1-10), una per monitorare la tensione della corrente continua di input (DC) e l'ultima posizione legge invece la tensione della corrente alternata che alimenta la centralina (AC) (fig. 7.6).



- **Figura 7.6** - Modulo di amplificazione (sinistra) e modulo di alimentazione (destra).

La parte frontale dei *moduli di amplificazione* è munita, per ciascuno dei due canali ospitati, di (vedi fig. 7.6):

- una manopola di bilanciamento resistivo del ponte, dotata di sistema di bloccaggio, con un intervallo di regolazione di  $\pm 2.000 \mu\epsilon$ , incrementabile, mediante un commutatore interno, a  $\pm 4.000 \mu\epsilon$  o  $\pm 6.000 \mu\epsilon$ ;
- una coppia di led di segnalazione per il bilanciamento all'amplificatore, il bilanciamento al ponte ed il segno della deformazione letta (trazione o compressione);
- una manopola di regolazione del guadagno all'amplificatore che, associata ad una vite di regolazione del moltiplicatore di guadagno, consente una variazione tra 1 e 2100 volte;
- due viti di regolazione: una agisce sulla tensione di eccitazione al ponte, l'altra sullo zero dell'amplificatore. La lettura del valore di tensione viene effettuata sul voltmetro del modulo di alimentazione, previo posizionamento della manopola di selezione sul canale in esame; la regolazione dello zero all'amplificatore fa riferimento ai led di bilanciamento;
- un interruttore di on-off dell'eccitazione al ponte del canale corrispondente;
- un interruttore di calibrazione a tre posizioni in grado di far slittare il riferimento al bilanciamento di ponte. Si va ad alterare il valore delle resistenze installate, simulando deformazioni impresse di  $\pm 1.000 \mu\epsilon$  con  $K_G = 2$ .

Sulla parte posteriore dei *moduli di amplificazione* sono presenti le connessioni di ingresso ed uscita del segnale di ciascuno dei due canali ospitati. La connessione d'ingresso, realizzata con connettori del tipo *commital IPT*, riceve l'estremità del cavo di collegamento del generico strumento. La connessione in uscita è realizzata con connettori a *piattine* sui moduli **2120A**, e con connettori *BNC* sui moduli **2120B**; ad essa viene collegato il cavo che trasferisce il segnale condizionato alla MORSETTIERA (figg. 7.4 e 7.5).

### 7.2.2 - MGCplus

Si tratta di una centralina digitale multi-canale, prodotta dalla **HBM**, in grado di amplificare e condizionare il segnale di strumenti a funzionamento sia resistivo che induttivo (fig. 7.7). Nella prova in esame sono state utilizzate due centraline della serie **MGCplus**: modello **AB12** la prima, modello **AB22A** la seconda; entrambe risultano praticamente munite delle medesime caratteristiche.

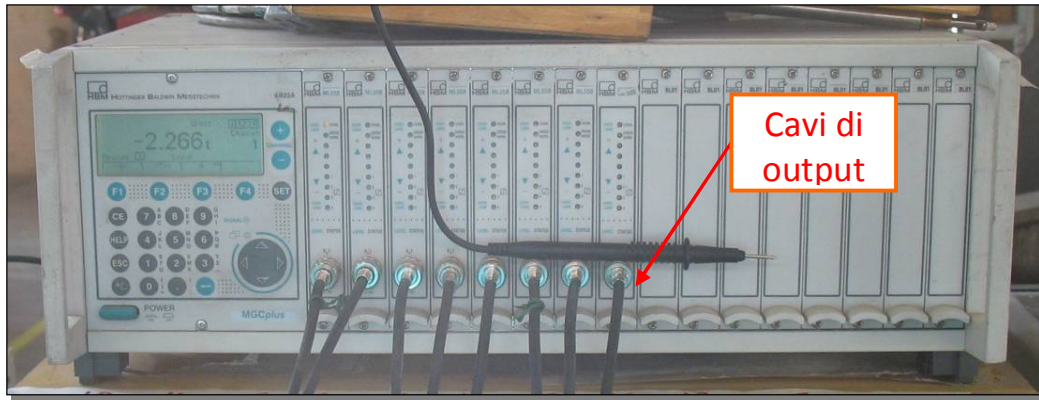


- Figura 7.7 –HBM MGCPlus.

Analogamente a quanto visto per le 2100, anche la MGCplus è costituita da 16 *moduli di misura monocanale*, un modulo di acquisizione ed uno di uscita per ogni canale, collegati ad un *modulo di alimentazione e gestione*; la massima frequenza di rilevazione è di 19,2 KHz per ogni canale, con una risoluzione di 20 bit.

Le regolazioni possibili sono analoghe a quelle descritte per le 2100, nel caso delle MGC risultano però tutte digitalizzate; una tastiera di selezione consente di selezionare il modulo in esame e di variarne i parametri, mentre uno schermo LCD consente di visualizzare le digitalizzazioni effettuate ed i valori letti. La possibilità di introdurre la costante di conversione e l'unità di misura relativa consente di visualizzare il valore definitivo della grandezza letta (es. carico in tonnellate per l'acquisizione da una cella di carico) (fig. 7.8).





- Figura 7.8 - Centralina MGCplus con cavi di output.

Le potenzialità offerte dalla digitalizzazione del segnale consentono inoltre il potenziamento degli interventi di condizionamento del segnale (filtraggio, commutazione, multiplexing ecc).

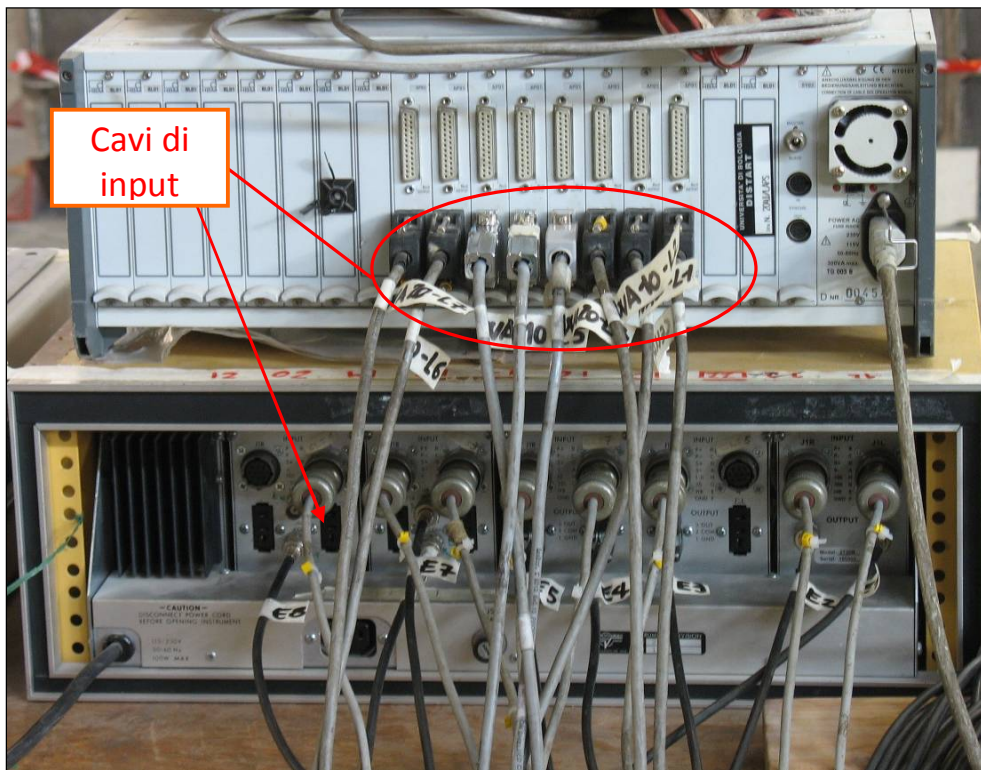


- Figura 7.9 - Connessione degli strumenti alla centralina 2110B.

L'ingresso del segnale avviene nella parte frontale del modulo di acquisizione, con la connessione dell'estremità del cavo di collegamento del generico strumento, mediante connettori *BNC*, mentre dalla parte posteriore del modulo di uscita si ha la connessione del cavo che trasferisce il segnale alla MORSETTIERA.

Le immagini 7.9 e 7.10 rappresenta il particolare delle connessioni di input ed output delle centraline, realizzate nella configurazione di prova.





- Figura 7.10 - Connessione degli strumenti alle centraline MGC (sopra) e 2110A (sotto).

### 7.2.3 - Morsettiera

Tutti i segnali, rilevati dagli strumenti ed in uscita dalle centraline di condizionamento, devono giungere alla scheda di acquisizione del PC sul quale è installato il software di acquisizione e gestione dei dati. La morsettiera (fig.7.11) ha la funzione di ricevere in input i cablaggi provenienti dalle centraline e di convogliarne i dati in un'unica uscita, collegata a sua volta al PC.

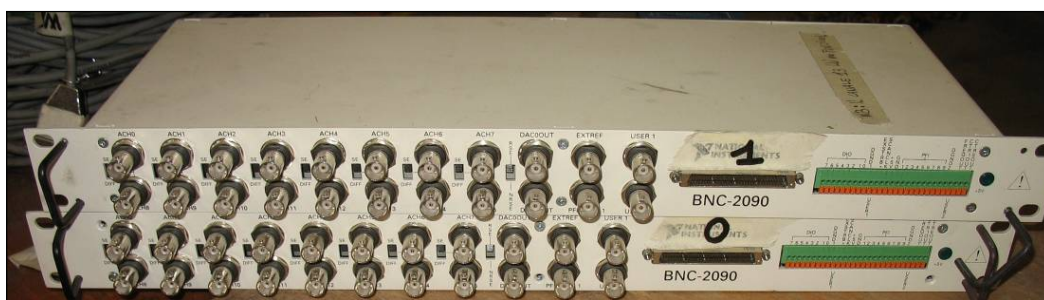


- Figura 7.11 – BNC 2090 Terminal Block

Nella prova ciclica si sono utilizzate due morsettiere modello **BNC- 2090**, prodotte dalla **National Instruments** (fig.7.12) , ognuna delle quali è dotata:

- nella parte frontale, di *16 canali in ingresso* e *6 canali in uscita* (per l'eventuale deviazione del segnale);
- nella parte posteriore, di *1 connessione di uscita* di sintesi dei segnali acquisiti.

Il cavo seriale che convoglia le letture sintetizzate al PC è del tipo *NI SHC68*, mentre i connettori frontali sono del tipo *BNC*. Risulta importante chiudere, mediante appositi tappi di isolamento, i connettori di input non utilizzati, onde evitare che il rischio dell'”effetto antenna” vada ad inquinare il segnale dei canali in connessione.



- **Figura 7.12** - Coppia di morsettiere BNC-2090 utilizzate.

#### **7.2.4 - Gruppo di continuità**

Le strumentazioni elettroniche, componenti il sistema di acquisizione, vengono collegate alla rete di alimentazione tramite un gruppo di continuità; si evita in tal modo il rischio di interruzione nell'acquisizione dei dati o di danneggiamento delle strumentazioni a causa di interruzioni o sbalzi di tensione.

Il gruppo di continuità utilizzato, prodotto dalla **APC** modello **Back-UPS RS 800**, è caratterizzato da: 4 prese di alimentazione in uscita; una tensione, sia in ingresso che in uscita, di 230 V; una potenza reattiva di 540 W ed una potenza apparente di 800 VA (fig. 7.13).



- Figura 7.13 - Gruppo di continuità Back-UPS RS 800: vista frontale e posteriore.

### 7.3 - Software di acquisizione dati

Le letture strumentali, condizionate dalle centraline di acquisizione e convogliate dalle morsettiere, giungono alla scheda di acquisizione del calcolatore per essere convertite in dati e registrate su apposito file di output; il software di acquisizione dati utilizzato nella prova di caricamento ciclico del nodo, è stato sviluppato nell'ambiente di programmazione denominato **LabVIEW 8.2**.

#### 7.3.1 - Descrizione di LabVIEW

LabVIEW (abbreviazione di *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) è l'ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio di programmazione visuale di **National Instruments**; tale linguaggio di programmazione si distingue dai linguaggi tradizionali in quanto grafico, ed è per tale motivo denominato *G-Language* (Graphic Language). Un programma o sottoprogramma G, definito **V.I.** (*Virtual Instrument*), non esiste sotto forma di testo, ma può essere salvato solo sotto forma di file binario, visualizzabile e compilabile esclusivamente da LabVIEW.

La definizione di strutture dati ed algoritmi avviene mediante icone ed altri oggetti grafici, ognuno dei quali incorpora determinate funzioni, uniti da linee di collegamento (*wire*). Si viene in tal modo a formare una sorta di diagramma di flusso; una rappresentazione logica in cui la sequenza di esecuzione è definita e rappresentata dal flusso dei dati stessi attraverso i fili monodirezionali che collegano i blocchi funzionali, e che viene denominata quindi *dataflow* (flusso di dati). Poiché i dati possono anche

scorrere in parallelo, attraverso blocchi e fili non consecutivi, il linguaggio realizza spontaneamente il multithreading senza bisogno di richiedere esplicita gestione da parte del programmatore.

Altra caratteristica distintiva è la velocità nella realizzazione del software, limitandosi spesso al semplice collegamento di blocchi già pronti, grazie alla vasta libreria di funzioni predefinite e driver di gestione dell'hardware; inoltre, la completa compatibilità con i modelli dei più importanti costruttori di strumenti programmabili e schede di acquisizione, garantisce l'ottima versatilità di utilizzo dei programmi realizzati in LabVIEW.

### ***7.3.2 - Dettagli dei V.I.***

Nell'ambiente di sviluppo, il Virtual Instrument risulta costituito da tre componenti principali:

- il *pannello frontale*;
- lo *schema a blocchi*;
- il *riquadro connettori*.

#### **7.3.2.1 Pannello Frontale**

Il pannello frontale (fig.7.14) è l'interfaccia utente del V.I.. Viene realizzato per mezzo di *controlli* e *indicatori* che costituiscono i terminali interattivi d'ingresso e d'uscita, rispettivamente; tali componenti sono ben più numerosi e complessi dei widget normalmente forniti dal sistema operativo.

I controlli sono matrici, manopole, potenziometri, pulsanti, quadranti e molti altri ancora; simulano i dispositivi d'ingresso degli strumenti e forniscono dati allo schema a blocchi del V.I..

Gli indicatori sono grafici, tabelle, LED, termometri e molti altri; simulano i dispositivi d'uscita degli strumenti e visualizzano i dati che lo schema a blocchi acquisisce o genera.

#### **7.3.2.2 Schema a blocchi**

Lo schema a blocchi è il diagramma di flusso che rappresenta il codice sorgente in formato grafico. Gli oggetti del pannello frontale, visti in precedenza, appaiono come *terminali* di ingresso o uscita nello schema a blocchi.

Gli oggetti dello schema a blocchi comprendono:

- *terminali*;
- *funzioni*;
- *costanti*;
- *strutture*;
- chiamate ad altri V.I. (*sub V.I.*);
- *fili* di collegamento;
- *commenti testuali*.

Le *funzioni* sono chiamate esse stesse V.I., anche se non hanno un loro pannello e un loro schema a blocchi. Possono avere un numero indefinito di ingressi e di uscite, come ogni V.I..

Le *strutture* eseguono il controllo di flusso di base; ad esempio il *ciclo for* è rappresentato da un contenitore quadrato che ripete N volte la porzione di schema a blocchi che si trova al suo interno.

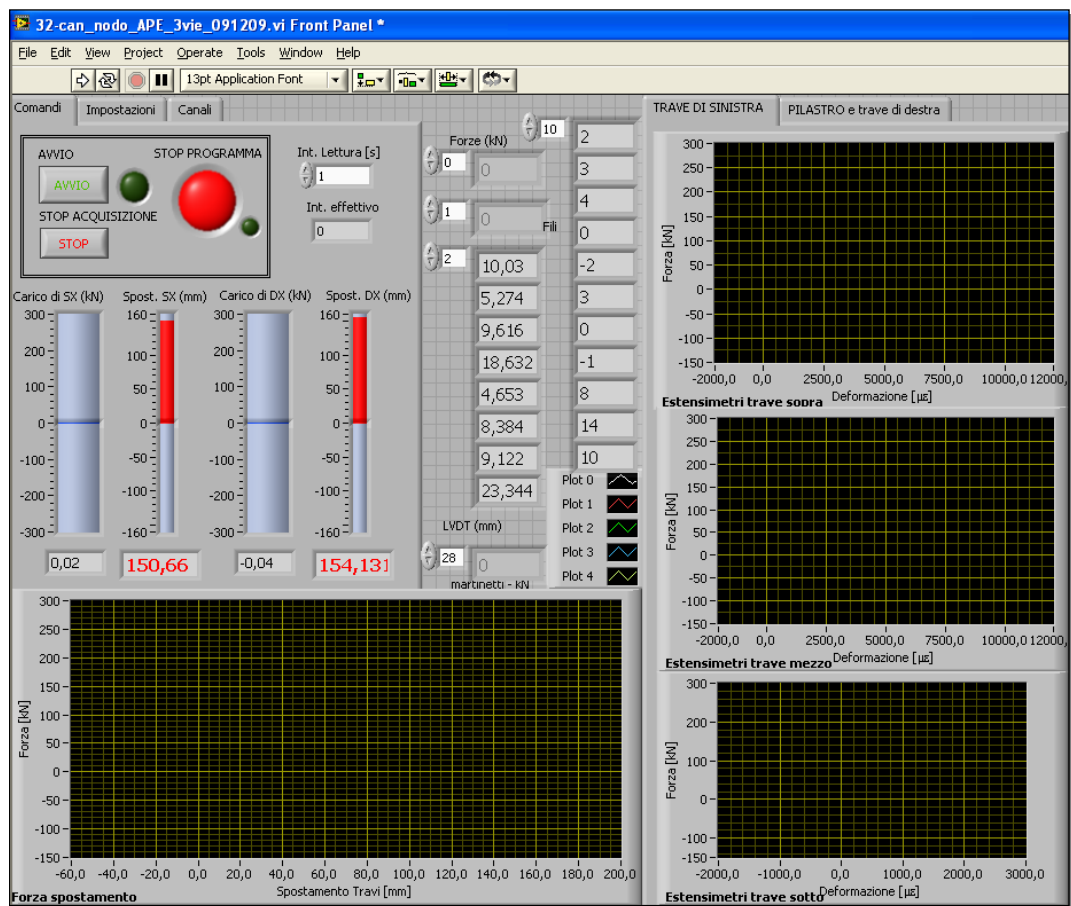
I *fili* di collegamento possono trasportare teoricamente qualunque mole di dati di qualunque tipo, anche aggregati (*bundle*) definiti dal programmatore. Il colore e lo spessore del filo cambia di conseguenza per permetterne una facile identificazione; ad esempio gli interi scorrono su fili *blu* e le stringhe su fili *rosa*.

Lo schema a blocchi può essere reso visibile anche durante l'esecuzione del programma; aspetto molto utile in fase di debug, poiché a richiesta risulta possibile visualizzare con un'animazione al rallentatore il movimento dei dati lungo i fili ed il loro valore momentaneo.

#### 7.3.2.3 Riquadro connettori

Ogni V.I. può essere a sua volta utilizzato come *sub V.I.* (o sotto *V.I.*) e comparire all'interno dello schema a blocchi di altri V.I., proprio come una qualsiasi funzione, e come tale può avere ingressi ed uscite a cui collegare le linee di flusso. Il riquadro connettori serve appunto a definire qual è l'aspetto del V.I. quando appare come subV.I. in uno schema a blocchi: che grafica di rappresentazione ha l'icona, ma soprattutto come e dove vanno collegate le linee per permettere il passaggio dei dati. In genere con pochi click ogni controllo può essere associato ad un ingresso e ogni indicatore può essere associato ad un'uscita.





- **Figura 7.14** - Schermata della cartella Comandi del Pannello frontale contenente le caselle di input per le costanti di conversione e le rappresentazioni grafiche dinamiche delle misure rilevate.

## **MODALITA' ESECUTIVE DI PROVA**

Nel presente capitolo si descrivono le modalità di svolgimento della prova, elencando le modalità applicative ed i livelli prefissati per i carichi sperimentali adottati. Si intende inoltre avvalorare le scelte effettuate, descrivendone i principi che ne sono alla base e prefigurandone gli obiettivi che si vogliono perseguire. Nel paragrafo 8.2 vengono introdotte le caratteristiche dei materiali utilizzati, le geometrie di applicazione del carico ed infine i valori teorici delle sollecitazioni resistenti, fornite dai progettisti dell'opera oggetto d'indagine. Nel paragrafo 8.3 vengono illustrate le modalità di applicazione dei carichi e le convenzioni adottate nel corso della prova; vengono inoltre descritte nel dettaglio le relazioni che intercorrono tra i valori di carico prefissati ed i valori teorici di calcolo relativi alle sollecitazioni di progetto e di resistenza ultima. Al termine del capitolo viene riportata una tabella riassuntiva rappresentativa delle modalità e dei valori adottati nell'applicazione ciclica delle serie di carico di prova; inoltre si rappresenta, mediante dei grafici, la storia di carico e la storia di spostamento registrate durante la prova.

### **8.1 - Generalità**

La prova di carico ciclico sul nodo in questione è stata effettuata il 27 luglio 2010, dopo aver lasciato maturare il getto integrativo di calcestruzzo per 22 giorni. La sollecitazione ciclica del nodo è stata suddivisa in 9 serie progressive di caricamento; all'interno di ciascuna delle prime 8 serie il ciclo di applicazione dei valori massimi di spinta e trazione prefissati è stato ripetuto per 3 volte, mentre nell'ultima serie si è eseguito solamente metà ciclo portando il pistone di carico fino a fine corsa.

Per ottenere un riscontro teorico del comportamento sperimentale della struttura, i valori massimi di trazione e compressione, da raggiungere in ogni serie di carico, è stato fissato in funzione delle sollecitazioni resistenti ultime di progetto determinate in corrispondenza della sezione d'innesto della trave; tali valori di progetto sono stati desunti dalla documentazione esecutiva fornita dai tecnici della ditta APE, realizzatrice dell'opera e committente dell'indagine sperimentale.

## 8.2 - Valori teorici delle sollecitazioni di progetto

Il nodo di estremità oggetto di prova, così come l'intera struttura prefabbricata a cui appartiene, è stato progettato nel rispetto delle prescrizioni di norma riguardanti la resistenza alle azioni sismiche, garantendone un comportamento dissipativo che rispetti le indicazioni relative alla classe di duttilità bassa.

I *materiali* utilizzati sono:

- calcestruzzo per getti prefabbricati avente classe di resistenza  $R_{ck} \geq 50 \text{ N/mm}^2$  ;
- calcestruzzo per getti integrativi avente classe di resistenza  $R_{ck} \geq 30 \text{ N/mm}^2$  ;
- acciaio per cemento armato *B450C* saldabile.

I *valori delle resistenze caratteristiche di progetto* utilizzati nei calcoli sono:

- resistenza caratteristica cilindrica a compressione del calcestruzzo *C40/50*, utilizzato per i getti prefabbricati:  $f_{ck,d[pref.]} = 45,3 \text{ N/mm}^2$  ;
- resistenza caratteristica cilindrica a compressione del calcestruzzo *C25/30*, utilizzato per i getti integrativi:  $f_{ck,d[opera]} = 33,0 \text{ N/mm}^2$  ;
- tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio *B450C*:  $f_{yk,d} = 490 \text{ N/mm}^2$  .

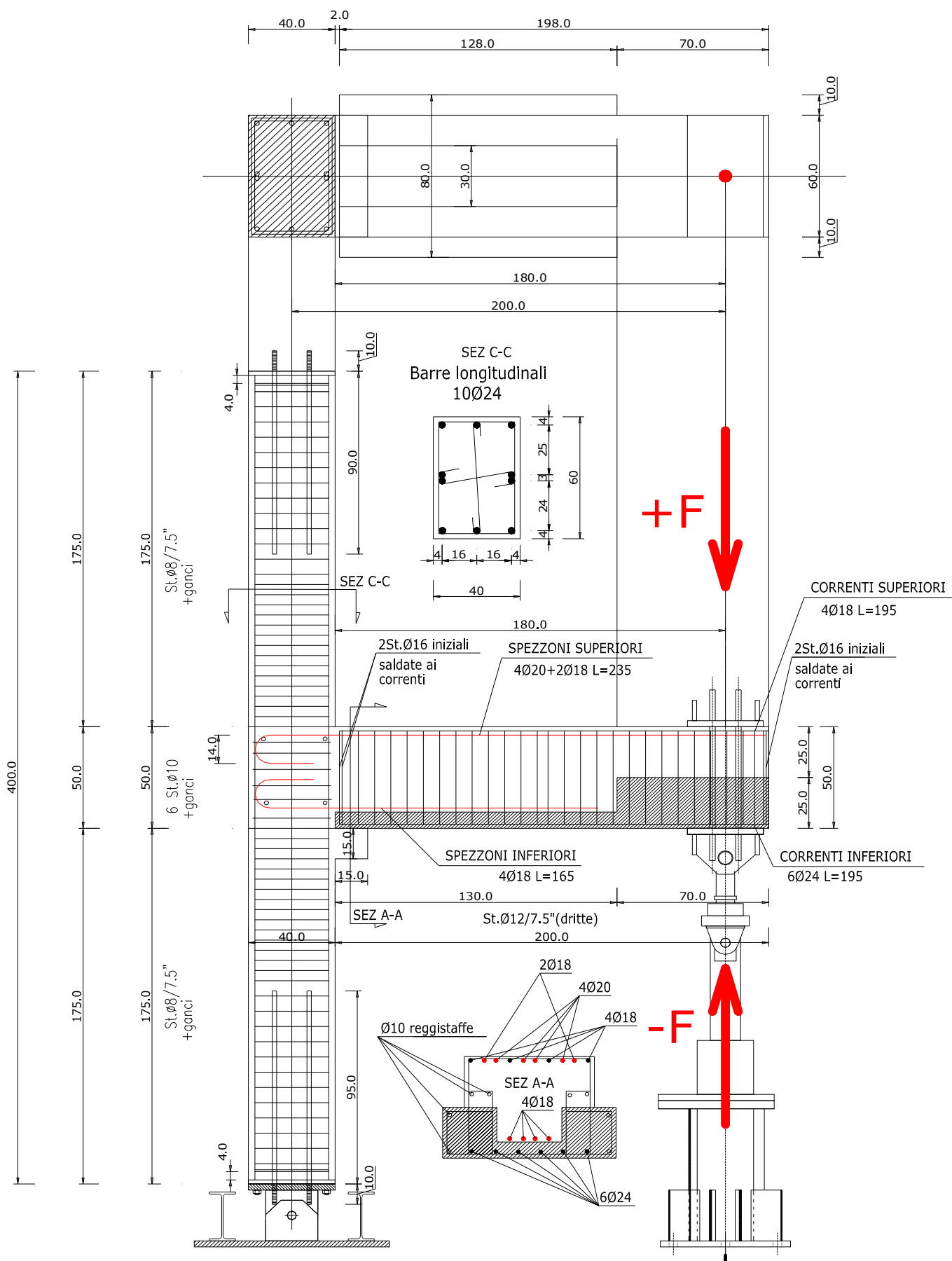
La sollecitazione dell'elemento prefabbricato sottoposto a prova viene aumentata fino a rottura, registrando il corrispondente carico di collasso. Un valore teorico di confronto con la rilevazione sperimentale può essere dedotto dalle *sollecitazioni resistenti sperimentali di calcolo*, valutate in corrispondenza delle sezioni di collegamento di trave e pilastro al nodo d'angolo, determinate utilizzando i valori caratteristici delle resistenze dei materiali; momenti e tagli resistenti ultimi vengono determinati senza applicare i coefficienti riduttivi per le resistenze di lunga durata ed i coefficienti parziali di sicurezza.

Tuttavia, anche i *valori fattorizzati delle sollecitazioni resistenti*, determinate con il consueto metodo di progetto agli stati limite, risultano significative ai fini del raffronto con i dati sperimentali. Le modalità di applicazione del carico consentono, infatti, di giungere al collasso strutturale per mezzo di una sequenza di incrementi gradualmente; si ha pertanto l'opportunità di analizzare il comportamento della struttura soggetta anche ai

carichi che inducono, nella sezione estrema della trave, le sollecitazioni prossime ai valori di progetto.

Inoltre, come si vedrà in dettaglio nel paragrafo successivo, i livelli di carico fissati per ogni serie vengono dedotti come frazione percentuale dell'azione in grado di generare, nella sezione d'estremità della trave (sezione A-A' in fig. 8.1), proprio la sollecitazione flessionale di progetto agli SLU.

Nello schema di figura 8.1 si sono evidenziate le sezioni di riferimento per il calcolo delle sollecitazioni, assieme all'indicazione delle armature considerate a flessione ed a taglio; si è inoltre rappresentato l'asse del pistone di carico, indicandone l'eccentricità rispetto alla sezione di riferimento posta all'estremità della trave.



- **Figura 8.1** - Schema delle geometrie di applicazione del carico e delle sezioni di progetto.



I valori riportati di seguito rappresentano le sollecitazioni resistenti determinate dai progettisti dell'opera oggetto di prova, riferite alle sezioni indicate in figura 9.1 (*sezione A-A'* all'estremità della trave e generica *sezione B-B'* del pilastro).

TRAVE:

*Momento resistente di progetto agli SLE che tende le fibre superiori:*

$$M_{rd,SLE} = 200.000 \text{ Nm} ;$$

*Momento resistente di progetto agli SLU che tende le fibre superiori:*

$$M_{rd,SLU} = 301.330 \text{ Nm} ; \quad (1)$$

*Momento resistente ultimo sperimentale teorico che tende le fibre superiori:*

$$M_{r,estr.(ult.)} = 433.000 \text{ Nm} , \left( x/d \right)_{ult.,estr.} = 0,10 ; \quad (2)$$

*Momento resistente ultimo sperimentale teorico che tende le fibre inferiori:*

$$M_{r,intr.(ult.)} = 195.000 \text{ Nm} , \left( x/d \right)_{ult.,intr.} = 0,08 ; \quad (3)$$

*Taglio resistente ultimo sperimentale teorico con riferimento al calcestruzzo:*

$$V_{r,max(ult.)} = 1.688 \text{ KN} , \left( \cotg\theta = 2 \right) ;$$

*Taglio resistente ultimo sperimentale teorico con riferimento all'acciaio:*

$$V_{r,S(ult.)} = 1.252 \text{ KN} , \left( \cotg\theta = 2 \right) .$$

PILASTRO:

*Momento resistente ultimo sperimentale teorico a carico assiale N = cost.:*

$$M_{r(ult.)} = 475.000 \text{ Nm} ;$$

*Sforzo assiale resistente ultimo sperimentale teorico:*

$$N_{r(ult.)} = 614 \text{ KN} ;$$

*Taglio resistente ultimo sperimentale teorico con riferimento al calcestruzzo:*

$$V_{r,max(ult.)} = 848 \text{ KN} , (\cotg\theta = 2);$$

*Taglio resistente ultimo sperimentale teorico con riferimento all'acciaio:*

$$V_{r,S(ult.)} = 701 \text{ KN} , (\cotg\theta = 2).$$

La normativa attualmente in vigore prevede, in fase di progettazione ai fini della resistenza ad azioni sismiche di strutture dotate di comportamento dissipativo (vedi cap. 7 della normativa [DM 14-01-2008]), che le parti strutturali non dissipative ed i collegamenti delle parti dissipative al resto della struttura possiedano, nei riguardi delle zone sede di cerniere plastiche, una sovrarresistenza sufficiente a consentire lo sviluppo in esse della plasticizzazione ciclica. Tutto ciò è alla base del *criterio della gerarchia delle resistenze* (capacity design) e si traduce, nel caso pratico in esame, nel tutelare il pilastro del nodo d'angolo dalla plasticizzazione prematura; si procede quindi nel verificare che la sua resistenza complessiva sia maggiore della resistenza complessiva della trave, garantendo inoltre un idoneo coefficiente di sicurezza. Assumendo come momenti resistenti di progetto del pilastro i valori calcolati in corrispondenza delle sollecitazioni assiali prodotte dalle combinazioni sismiche delle azioni, e considerato che per le strutture realizzate in CD"B" occorre garantire almeno il 10% di sovrarresistenza ( $\gamma_{Rd} = 1,10$ ), si è potuto verificare che:

$$\text{sovrarresistenza pilastro- trave} = \sum M_{rd,PIL} / \sum M_{rd,TR} = 2,2 > 1,1.$$

Onde evitare che il criterio di verifica flessionale appena argomentato venga reso vano dalla formazione di meccanismi inelastici dovuti al taglio, si rende necessario effettuare un'ulteriore verifica. Applicati alle estremità del pilastro i corrispondenti momenti resistenti di progetto, si va ad individuare la sollecitazione tagliante simmetrica in grado di soddisfare l'equilibrio alla rotazione; basterà quindi verificare che tale sollecitazione risulti inferiore al più basso dei valori dei tagli resistenti di progetto, valutati in corrispondenza delle sezioni estreme del pilastro. Garantendo, al solito, una sovrarresistenza del 10 %, si è verificato quanto segue:

$$\text{sovrarresistenza taglio pilastro} = V_{rd,Spil} / \left[ \left( \sum M_{rd,inf} / \sum M_{rd,sup} \right) / L_p \right] = 2,3 > 1,1.$$

### 8.3 - Definizione dei livelli di carico

La prova di carico effettuata sulla struttura di nodo ha come obiettivo primario quello di simulare, seppur con velocità molto più ridotte, gli effetti dell'azione orizzontale alternata prodotta dall'azione sismica. Dovrà trattarsi pertanto di un caricamento di tipo ciclico; ovvero l'azione trasversale, applicata all'estremità della trave mediante pistone, viene ad assumere alternativamente determinati valori in spinta e trazione, completando ogni ciclo al terzo passaggio per il livello nullo di carico. Inoltre il carico viene aumentato per step successivi, realizzando delle serie di applicazioni, ciascuna delle quali costituita da un certo numero di cicli di ripetizione. Risulta possibile, in tal modo, rilevare sia il comportamento della struttura di nodo al crescere delle sollecitazioni di segno opposto, valutandone in ultimo anche la resistenza del collegamento, sia apprezzare l'entità della dissipazione energetica che si manifestano nell'isteresi ciclica.

La prova di carico prevede una fase iniziale in *controllo di forza*, nella quale, una volta fissati i livelli di carico a cui giungere per ciascuna delle serie cicliche, si procede analizzando l'azione rilevata dalla cella di carico ed operando di conseguenza sulla centralina di comando del pistone. Per carichi superiori ai valori teorici di rottura, la prova procede in *controllo di spostamento*, con l'assegnazione di spostamenti limite a cui giungere per ciascuna ulteriore fase di carico; agendo sempre sulla centralina di comando del pistone, si procede monitorando la lettura effettuata dal filo estensibile posto all'estremità della trave ed invertendo la direzione di spinta in prossimità dei valori limite di spostamento.

Per comprendere meglio i chiarimenti riportati di seguito, si tenga conto che il pistone di carico:

- lavora in trazione applicando azioni rivolte verso il basso, rilevate dalla cella con segno +, che inducono abbassamenti dell'estremità della trave ad esso collegata, rilevati dal filo estensibile col segno + (le fibre d'estradosso della trave risultano tese);
- lavora in compressione applicando azioni rivolte verso l'alto, rilevate dalla cella con segno -, che inducono sollevamenti dell'estremità della trave ad esso collegata, rilevati dal filo estensibile col segno - (le fibre d'intradosso della trave risultano tese).

### 8.3.1 - Serie di carico condotte in controllo di forza

Come già argomentato nel paragrafo precedente, la struttura di nodo è stata realizzata con l'intento progettuale di favorire, in occasione di eventi sismici di determinata entità, la plasticizzazione del concio di trave di collegamento al nodo, preservando l'integrità del pilastro; risulta quindi logico relazionare la scelta dei livelli di carico, utilizzati per ogni serie di applicazioni cicliche, al valore delle sollecitazioni resistenti calcolate in corrispondenza della sezione di collegamento della trave. Poiché tale sezione risulta non simmetrica per quanto riguarda la disposizione delle armature, e disomogenea per la presenza di differenti qualità di calcestruzzo, occorre anzitutto determinare una proporzione tra l'entità dei carichi in compressione ed in trazione, in modo tale da indurre livelli tensionali simili nelle fibre d'intradosso ed estradosso della sezione. Si considera, a tale scopo, il rapporto tra i momenti resistenti ultimi all'intradosso e all'estradosso:

$$M_{r,intr.(ult.)}/M_{r,estr.(ult.)} = 195.000/433.000 = 0,45 \quad (4)$$

Le serie di carico condotte in controllo di forza sono **6**, ciascuna delle quali costituita da **3** cicli di ripetizione dei livelli di carico. Si è scelto di definire i livelli di carico massimi raggiunti in corrispondenza di ogni serie ciclica, condotta in controllo di forza, come frazione percentuale del valore di carico in trazione (il carico è rivolto verso il basso tendendole fibre superiori della trave) che risulta in grado di generare, nella sezione di estremità trave, una sollecitazione flessionale pari al momento resistente di progetto agli SLU.

Basta pertanto dividere il momento resistente di progetto agli SLU per il braccio d'azione dell'asse del pistone (vedi schema fig. 8.1), riferiti entrambi alla sezione della trave che si collega al nodo, per ottenere il carico in trazione di riferimento:

$$F_{rd,SLU} = M_{rd,SLU} / b_p = 301.330 / 1,8 \cong 166 \text{ KN} . \quad (5)$$

Moltiplicando tale azione per la percentuale fissata, si ottiene il carico massimo a cui giungere, in trazione, nella fase considerata; moltiplicando ulteriormente il valore così ottenuto per il rapporto fornito dalla (4), si ottiene il carico massimo a cui giungere, in compressione, nella medesima fase.

Si effettua a titolo esplicativo il calcolo dei livelli di carico massimi a cui giungere in prima serie, denominata AA, fissando una percentuale del 40%:

$$\text{serie AA} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{AA, \text{traz.}} = F_{rd, SLU} \cdot 0,4 \cong 66 \text{ KN} \\ \uparrow F_{AA, \text{compr.}} = -F_{rd, SLU} \cdot 0,4 \cdot 0,45 \cong -30 \text{ KN} \end{array} \right.$$

Si procede in maniera analoga per le ulteriori 5 serie di carico, condotte sempre in controllo di forza, fissando delle quote percentuali del carico in trazione di riferimento pari al 60%, 80%, 100%, 120% e 145%. Si riportano di seguito i valori ottenuti:

$$\text{serie BB} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{BB, \text{traz.}} = 100 \text{ KN} \\ \uparrow F_{BB, \text{compr.}} = -45 \text{ KN} \end{array} \right.;$$

$$\text{serie CC} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{CC, \text{traz.}} = 133 \text{ KN} \\ \uparrow F_{CC, \text{compr.}} = -60 \text{ KN} \end{array} \right.;$$

$$\text{serie DD} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{DD, \text{traz.}} = 166 \text{ KN} \\ \uparrow F_{DD, \text{compr.}} = -75 \text{ KN} \end{array} \right.;$$

$$\text{serie EE} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{EE, \text{traz.}} = 200 \text{ KN} \\ \uparrow F_{EE, \text{compr.}} = -90 \text{ KN} \end{array} \right.;$$

$$\text{serie FF} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow F_{FF, \text{traz.}} = 240 \text{ KN} \\ \uparrow F_{FF, \text{compr.}} = -108 \text{ KN} \end{array} \right.$$

Poiché l'ultima percentuale scelta è fornita dal rapporto tra il momento resistente ultimo sperimentale teorico ed il momento resistente di progetto agli SLU ( $M_{r, \text{estr. (ult.)}} / M_{rd, SLU} \cong 1,45$ ), forniti rispettivamente dalle relazioni (1) e (2), i corrispondenti valori limite di carico relativi alla serie FF corrispondono alle azioni in grado di generare, nella sezione di estremità della trave, la *sollecitazione flessionale di rottura teorica*.

### 8.3.2 - Serie di carico condotte in controllo di spostamento

Completate le 6 fasi di carico condotte in controllo di forza ci si è riservati l'opportunità di scegliere, a prova in corso, le modalità operative con cui procedere nell'applicazione del carico. Poiché al termine della serie di carico FF l'avanzato stato deformativo,



localizzato prevalentemente in corrispondenza della sezione di collegamento della trave al pilastro, preannunciava il verificarsi di deformazioni elevate anche per piccoli incrementi di carico, si è deciso di assumere lo spostamento all'estremità della trave come nuova variabile di controllo. Al termine della serie di carico FF lo spostamento massimo in abbassamento e in sollevamento risultavano rispettivamente circa 47mm e 14mm.

Si è quindi deciso di fissare **3** ulteriori serie, tutte condotte in controllo di spostamento. Per le *prime due*, sempre costituite da **3** ripetizioni cicliche del carico, si sono fissati degli spostamenti limite rispettivamente di: 80 mm in abbassamento e 25 mm in sollevamento; 120 mm in abbassamento e 40 mm in sollevamento. Per l'ultima serie di carico si è invece realizzato metà ciclo di carico, effettuato un'unica trazione della trave fino ad indurne un abbassamento dell'estremità pari a 180 mm, pari praticamente il fine corsa del filo estensibile, ed annullando quindi il carico al pistone.

La tabella 8.1 riassume tutte le informazioni relative alle modalità applicative del carico adottate, sia in fase di controllo di forza che in fase di controllo di spostamento. Assieme all'indicazione dei valori estremi di carico, prefissati per la fase in controllo di forza, si indicano anche le rispettive frazioni percentuali relative al carico che induce, nella sezione di collegamento della trave, la coppia resistente di progetto agli SLU; mentre unitamente all'indicazione dei valori estremi di deformazione, prefissati per la fase in controllo di spostamento, si indicano anche i valori estremi di carico raggiunti nell'arco della singola serie di cicli.

Serie di carico	n° Cicli	Note	Tipo di controllo	Limiti di carico (KN) (% carico agli SLU)		Limiti di spostamento (mm) (valori estremi di carico raggiunti nella serie)	
				↓ traz. <sup>ne</sup>	↑ comp. <sup>ne</sup>	↓ abb. <sup>nto</sup>	↑ soll. <sup>nto</sup>
AA	3	/	forza	66 (40%)	-30	/	/
BB	3	/	forza	100 (60%)	-45	/	/
CC	3	/	forza	133 (80%)	-60	/	/
DD	3	Carico di progetto agli SLU	forza	166 (100%)	-75	/	/
EE	3	/	forza	200 (120%)	-90	/	/
FF	3	Carico di rottura sperimentale teorico	forza	240 (145%)	-108	/	/
GG	3	/	spostamento	/	/	80 (230/280 KN)	-25 (-130/- 120 KN)
HH	3	/	spostamento	/	/	120 (210/280 KN)	-40 (-135/- 130 KN)
II	½	Raggiungimento del fine corsa filo estensibile	spostamento	/	/	180 (240 KN)	//

- Tabella 8.1 - Descrizione ed indicazione dei valori relativi alle modalità applicative dei carichi.



## **Capitolo 9**

### **ELABORAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI**

Il presente capitolo costituisce la parte fondamentale dell'indagine sperimentale svolta, trattando la descrizione e l'argomentazione dei risultati forniti dalla prova ciclica sul collegamento strutturale in esame. Inoltre in tale capitolo si fornisce un confronto tra gli aspetti più significativi riguardanti i risultati ottenuti nella prova in esame (denominata anche II prova) effettuata il 27/07/2010 e quelli ottenuti nella prova effettuata il 9/12/2009 (denominata I prova o prova precedente).

Nel paragrafo 9.1 si forniscono informazioni generali che riguardano l'elaborazione dei dati e le convenzioni adottate sui segni. Nel paragrafo 9.2 si forniscono le prime rappresentazioni grafiche riguardanti i diagrammi che relazionano la forza applicata e gli spostamenti. Nel paragrafo 9.3 si fornisce un'analisi più dettagliata del comportamento globale del collegamento strutturale evidenziando la risposta fornita in termini di resistenza, rigidezza e dissipazione. Il paragrafo 9.4 invece fornisce un'analisi accurata del comportamento locale, in particolare del pannello di nodo, dell'interfaccia nodo-pilastro e dell'interfaccia nodo-trave.

#### **9.1 – Generalità**

L'indagine sui meccanismi resistenti che si sono istaurati nel nodo strutturale e nelle sezioni limitrofe degli elementi ad esso collegati viene svolta mediante il confronto tra gli effetti macroscopici (fessurazioni, spostamenti, espulsioni di copri ferro, ecc), rilevati in corrispondenza dei vari cicli di carico, ed i dati registrati dalle letture strumentali. Per rendere di facile comprensione l'enorme quantità di registrazioni effettuate si effettua un'elaborazione dei dati forniti dal software di acquisizione al fine di ricavarne una rappresentazione grafica.

Risulta in tal modo possibile ottenere grafici dell'andamento dei parametri globali, quali forza-spostamento e momento-curvatura, e locali, quali le singole letture di estensimetri e trasduttori induttivi di spostamento, grazie ai quali indagare nel dettaglio il comportamento della struttura oggetto di prova.

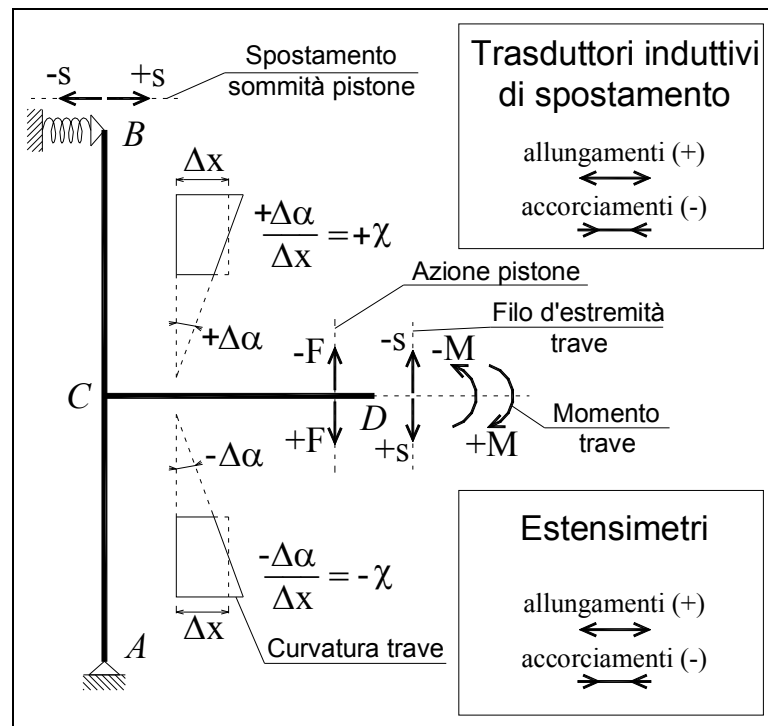
Le rappresentazioni grafiche dei risultati sperimentali richiedono una preventiva elaborazione dei dati registrati, finalizzata alla conversione del formato numerico ed alla precisa impostazione dello zero iniziale delle rilevazioni strumentali. Quindi le letture così rettificate possono venir singolarmente rappresentate in funzione del carico di prova, oppure relazionate tra loro al fine di costituire una rappresentazione di grandezze composte, quali momenti, curvature o componenti di spostamento depurate.

Il software di acquisizione dati fornisce un file di registrazione delle letture eseguite, visualizzabile con applicazioni quali EXCEL o similari. Tale file è strutturato in forma matriciale ed è composto da 33 colonne, la prima delle quali viene assegnata alla registrazione del tempo in secondi, mentre le rimanenti 32 sono destinate alla registrazione dei dati acquisiti. L'indice di colonna, delle 32 dedicate all'acquisizione dati vera e propria, viene assegnato alla registrazione dell'output del singolo strumento in ordine crescente ed in base al numero del canale di acquisizione a cui tale strumento è stato assegnato in fase di settaggio del software.

La prima elaborazione effettuata risulta l'impostazione dello zero in lettura iniziale di ogni canale acquisito. A tale scopo l'acquisizione dati è stata avviata qualche istante prima della prova, generando una serie di registrazioni delle deformazioni dell'opera oggetto d'indagine soggetta a valore nullo del carico applicato; la depurazione delle letture relative ai singoli canali ( e riportate nella generica colonna dati) viene quindi effettuata sottraendo ai relativi dati significativi una media di tali registrazioni iniziali.

Per i grafici riportati nel presente capitolo, a meno di differenti indicazioni, si fa riferimento alle convenzioni relative al segno delle azioni e degli spostamenti di nodo riportate in figura 9.1.





- Figura 9.1 - Convenzioni sui segni di sollecitazioni e spostamenti.

## 9.2 – Grafici relativi al comportamento globale

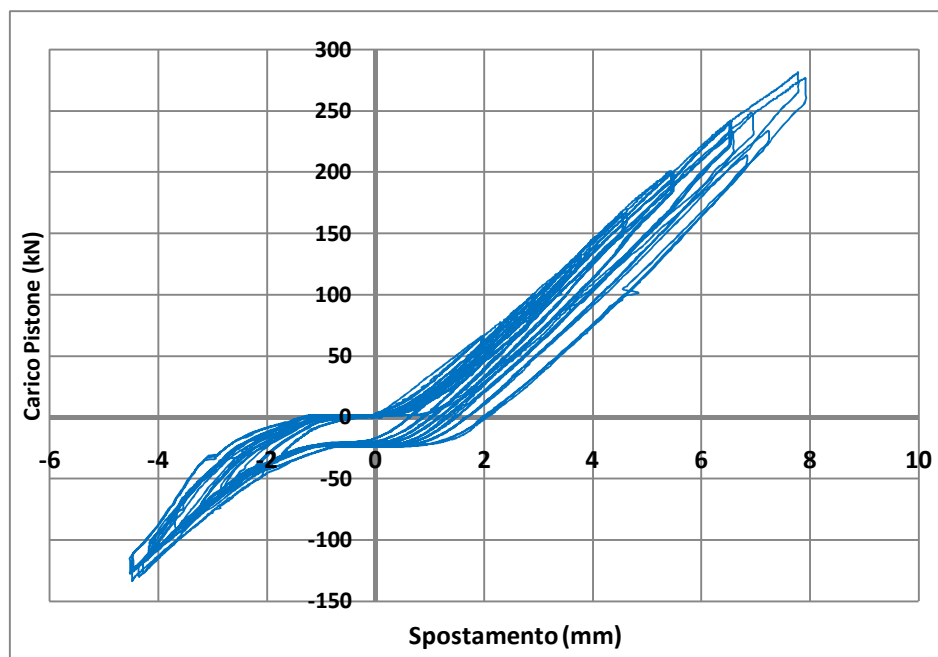
In questo paragrafo si forniscono gli andamenti dei diagrammi *forza-spostamento*, *momento-rotazione* e *momento-curvatura* rilevati nel corso della prova in esame, nel paragrafo 9.2.1 si fornisce un confronto con i relativi diagrammi rilevati nella I prova.

Il grafico *forza-spostamento totale* rappresenta l'andamento dei movimenti registrati dal filo estensibile, collegato all'estremità libera della trave, in funzione dei valori di carico applicati durante la prova. Tale diagramma costituisce una rappresentazione del comportamento globale del nodo d'angolo in grado di fornire informazioni sulla *resistenza*, la *rigidezza* e la *capacità dissipativa* che la struttura è in grado di fornire ad ogni ciclo di carico.

Le rilevazioni effettuate dal filo estensibile posto all'estremità della trave risultano tuttavia "inquinata" dagli effetti delle rotazioni rigide prodotte dai cedimenti della struttura di contrasto. Le azioni cicliche indotte dal carico di prova sulla struttura di contrasto inducono, infatti, degli spostamenti dovuti in parte ai cedimenti elastici relativi ai telai di controvento in acciaio, ed in parte generati dal recupero delle tolleranze di accoppiamento dei collegamenti; tali spostamenti, trasmessi alla sommità

del pilastro, inducono una rotazione rigida dell'intera struttura di nodo attorno alla cerniera di base del pilastro.

Al fine di depurare la lettura del filo estensibile dalle componenti di spostamento indotte dalla rotazione rigida, ci si avvale della rilevazione effettuata dal trasduttore induttivo L11 WA50-4, posto a battuta sulla sommità del pilastro la cui rappresentazione grafica è riportata in figura 9.2.



- Figura 9.2- Spostamenti della sommità del pilastro.

Dall'analisi delle curve in fig. 9.2 risulta evidente come, per azioni di trazione superiori al valore nullo e di compressione inferiori a  $-30\text{ kN}$ , vi sia un legame di linearità tra la variazione del carico e la corrispondente variazione dello spostamento; le inclinazioni delle linee di carico e scarico, sia per azione in trazione che in spinta del pistone, risultano praticamente uguali tra loro e pari, in valore, alla rigidezza alla traslazione verticale del sistema costituito dai telai di contrasto.

Il valore massimo dello spostamento orizzontale della sommità del pilastro, corrispondente alla trazione verso il basso del pistone, è di  $7,93\text{ mm}$ , mentre il valore minimo, corrispondente alla spinta verso l'alto del pistone, è di  $-4,49\text{ mm}$ ; entrambe le letture sono state realizzate durante il  $1^{\circ}$  ciclo di carico della *serie HH*, effettuata in controllo di spostamento.

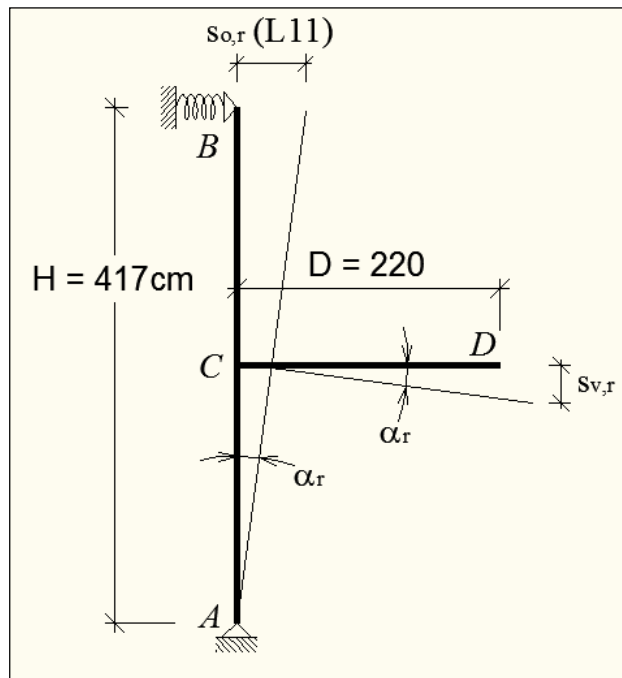
Nota la distanza tra la battuta dell'induttivo in L11, realizzata in corrispondenza del piano medio della piastra di sommità del pilastro, e l'asse del perno di snodo posto alla

base del pilastro, risulta possibile determinare, con buona approssimazione, la *rotazione rigida della struttura* come rapporto tra la lettura fornita dal trasduttore di sommità e detta distanza. La componente verticale dello spostamento indotto all'estremità della trave risulta pertanto definito dal prodotto della rotazione rigida determinata per la distanza tra l'asse del pilastro e l'estremità della trave. Con riferimento ai simboli ed ai valori riportati nello schema di figura 9.3 risulta pertanto possibile scrivere le relazioni seguenti:

- rotazione rigida (espressa in rad.):  $\alpha_r = \frac{s_{o,r}}{H} = \frac{L11}{H}^{(1)}$ ,
- spostamento verticale rigido d'estremità trave:  $s_{v,r} = \alpha_r \cdot D = \frac{L11}{H} \cdot D$ .

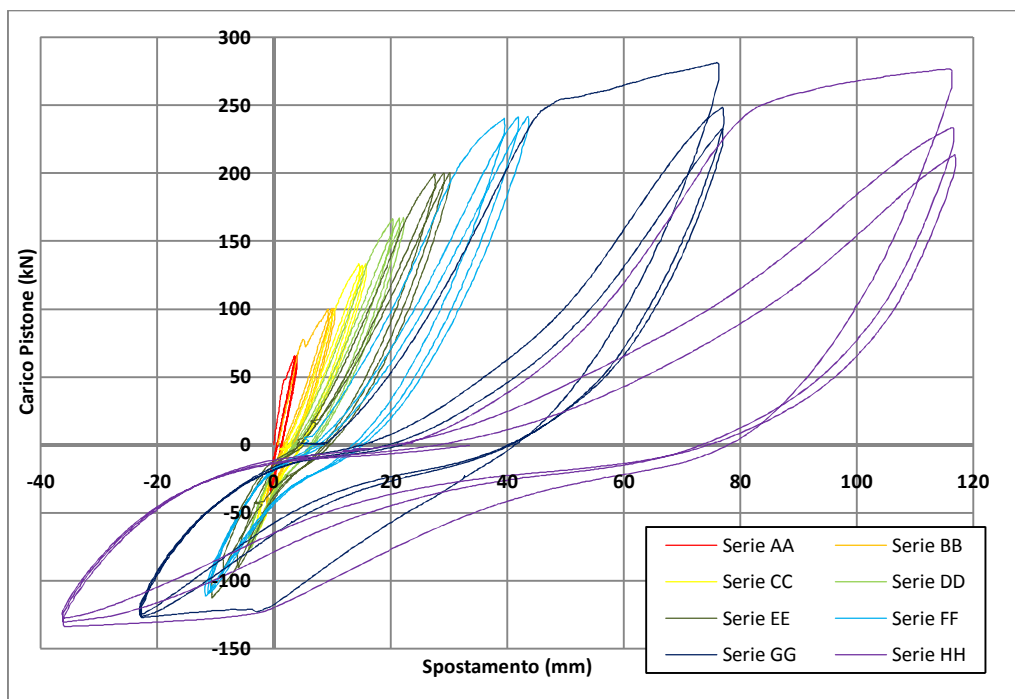
---

<sup>(1)</sup> Nelle relazioni in esame l'indicazione dello spostamento rilevato dallo strumento viene indicata con la sigla distintiva dello strumento stesso.

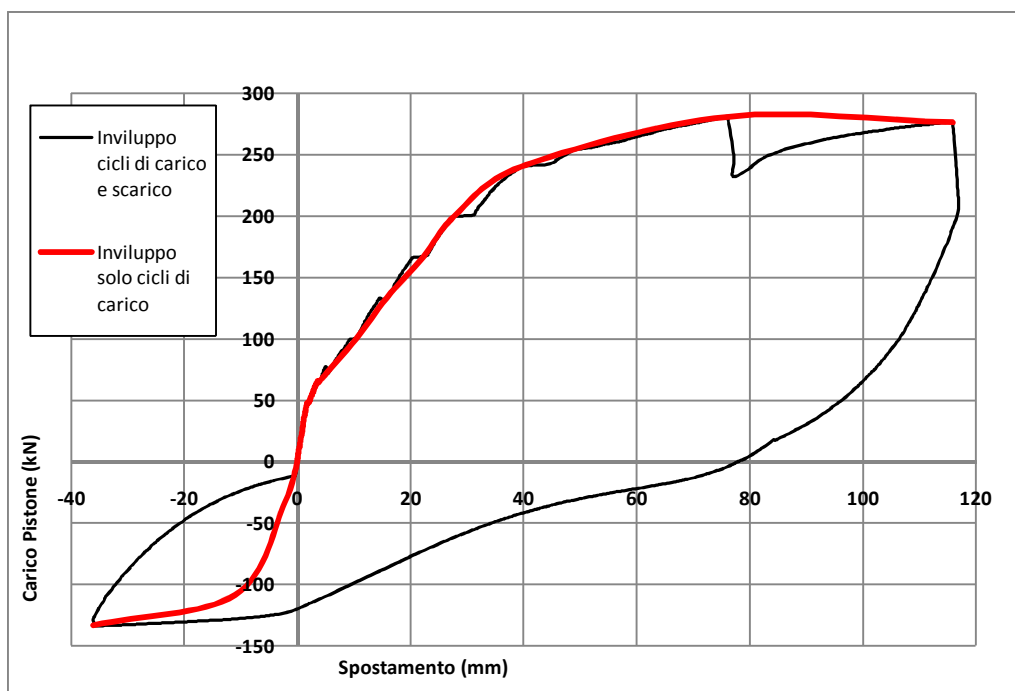


- **Figura 9.3** - Schema delle rotazioni e componenti di spostamento rigide.

Lo spostamento rigido verticale così definito segue le medesime convenzioni fissate per la lettura L11, quindi risulta sempre concorde allo spostamento rilevato dal filo estensibile; basta pertanto sottrarre tale valore dalla lettura effettuata dal filo estensibile per ottenere il valore dello *spostamento netto di estremità trave* indotto dalle sole deformazioni elastiche e plastiche della struttura. L'andamento dello spostamento netto in funzione del carico di prova è rappresentato in figura 9.4; l'adozione di differenti colorazioni permette, inoltre, di evidenziare le curve relative a ciascuna delle serie di carico, inoltre per consentire una migliore rappresentazione delle curve si è trascurata la linea relativa alla serie II.



- **Figura 9.4** – Diagramma dello spostamento in funzione del carico applicato all'estremità della trave.



- **Figura 9.5** – Involuppi del diagramma forza-spostamento



Dal grafico di figura 9.4 si può notare come nelle prime sei serie di carico (AA-FF), la curva non subisce repentine variazioni della pendenza. A partire dal primo ciclo di carico della serie GG si osserva, sia in trazione che in compressione, una improvvisa riduzione della pendenza che rappresenta lo snervamento globale del nodo strutturale in corrispondenza di un carico di trazione pari a 253kN e di uno spostamento positivo (verso il basso) pari a 48mm. Se si considera che il valore teorico del carico di rottura agli SLU è 166kN e lo si moltiplica per il coefficiente di sicurezza del calcestruzzo (1,5), allora si ottiene il valore 249kN che si avvicina molto al carico che determina plasticizzazione nel nodo registrato sperimentalmente.

Le serie di carico GG e HH si differenziano dalle precedenti in quanto il carico massimo raggiunto in ogni ciclo decresce col procedere del numero di cicli; questo fenomeno è legato alla perdita di rigidità della struttura e alla ridotta capacità dissipativa una volta superato lo snervamento (vedi par. 9.3.2).

Ottenuta quindi la rappresentazione dell'andamento degli spostamenti netti dell'estremità della trave, conseguenti ai carichi ciclici di prova, un'ulteriore elaborazione riguarda la realizzazione della curva d'involuppo dei valori estremi. In figura 9.5 vengono rappresentate due curve di involuppo: la prima (curva nera) unisce tutti i valori estremi del diagramma forza-spostamento netto, considerando sia le fasi di carico che di scarico dell'opera, la seconda unisce tutti i valori estremi relativi alle sole fasi di carico (curva rossa). Il secondo tipo di involuppo (curva rossa) esprime l'andamento degli spostamenti netti in funzione di un'ideale azione crescente monotona del pistone di carico, sia in trazione che in spinta.

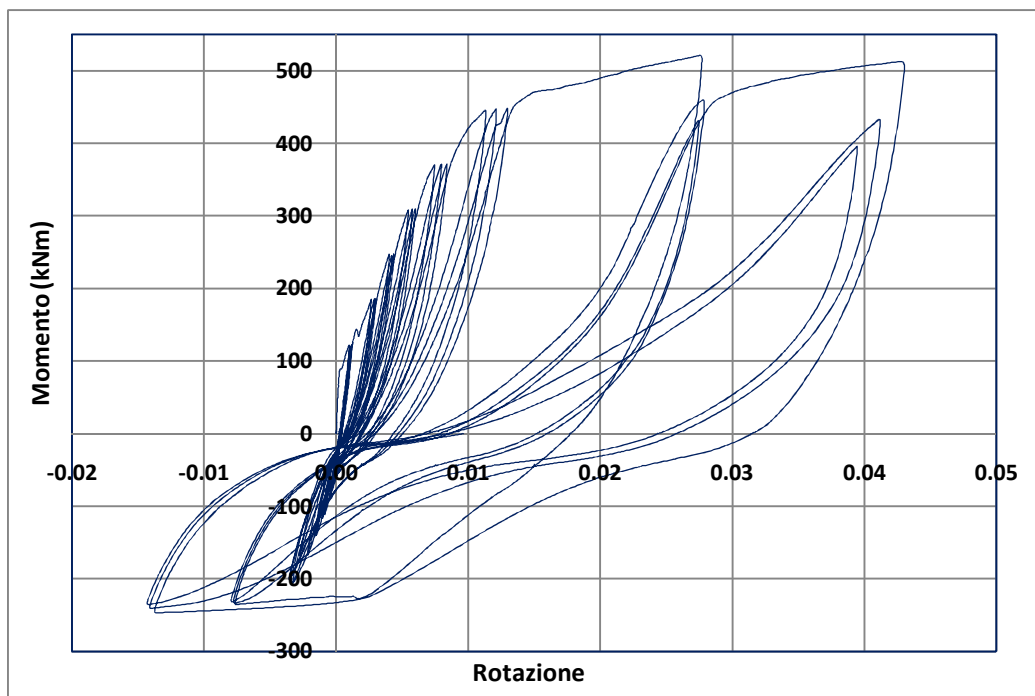
Analizzando la curva di involuppo relativa alle sole fasi di carico si può individuare facilmente lo stato in cui si trova il collegamento relativamente allo stadio non fessurato (stadio I) e allo stadio fessurato (stadio II).

Un'altra rappresentazione che mette in relazione la forza applicata con un parametro di spostamento è il diagramma momento-rotazione relativo al primo concio di trave di lunghezza 10 cm. Tale diagramma è stato realizzato grazie alle letture effettuate dagli induttivi posizionati nel primo concio di trave (vedi figura 7.1). Tali letture forniscono gli spostamenti relativi (contrazioni/dilatazioni) del concio in esame. Indicando con L1 la deformazione relativa dell'estradosso e con L46 quella dell'intradosso è possibile ricavare la rotazione relativa del primo concio di trave tramite la seguente relazione nella quale si è indicato con H la distanza tra i due lembi della trave.

$$\varphi = \frac{L1 - L46}{H}$$

Si nota che si è preferito una rappresentazione in termini di rotazione anziché di curvatura poiché è all'interfaccia trave-pilastro che si generano le fessurazioni maggiori che provocano una rotazione della trave (vedi figura 9.43). Risulta importante monitorare tale rotazione in continuo con la variazione del carico.

Tale diagramma è rappresentato in figura 9.6. Si nota come, in accordo con le convenzioni sui segni riportate in figura 9.1, a un momento applicato positivo corrisponde una rotazione negativa.



- Figura 9.6 – Diagramma Momento-Rotazione del 1° concio (l=10cm) di trave.

Risulta inoltre possibile rappresentare il digramma momento- curvatura relativo al secondo concio di trave. Tale diagramma è rappresentativo dai successivi 21cm di trave computati dalla sezione terminale del primo concio.

Gli induttivi a cui fare riferimento sono:

- L2 WA20-10: posto all'estradosso a battuta sulla sezione terminale del primo concio;

- L5 WA20-6 ed L7 WA20-7: posti all'intradosso della trave, in corrispondenza delle ali laterali (L5 lato LARM; L7 lato LAPS), entrambi a battuta sulla sezione terminale del primo concio.

Le deformazioni medie d'intradosso ed estradosso risultano esplicitabili, in funzione delle letture rilevate dagli induttivi, come segue:

- Deformazione media all'estradosso del secondo concio:

$$\varepsilon_{e2} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{L2[mm]}{210mm};$$

- Deformazione media all'intradosso del secondo concio:

$$\varepsilon_{i2} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\left(\frac{L5 + L7}{2}\right)[mm]}{210mm}.$$

La curvatura media  $\chi_2$  del secondo concio viene calcolata nel seguente

modo: 
$$\chi_2 = \frac{\varepsilon_{e2} - \varepsilon_{i2}}{h};$$

La relazione da usare risulta dunque: 
$$\chi_2 = \frac{\varepsilon_{e2} - \varepsilon_{i2}}{h} = \frac{\varepsilon_{e2} - \varepsilon_{e2}}{0,54} \frac{1}{m}$$

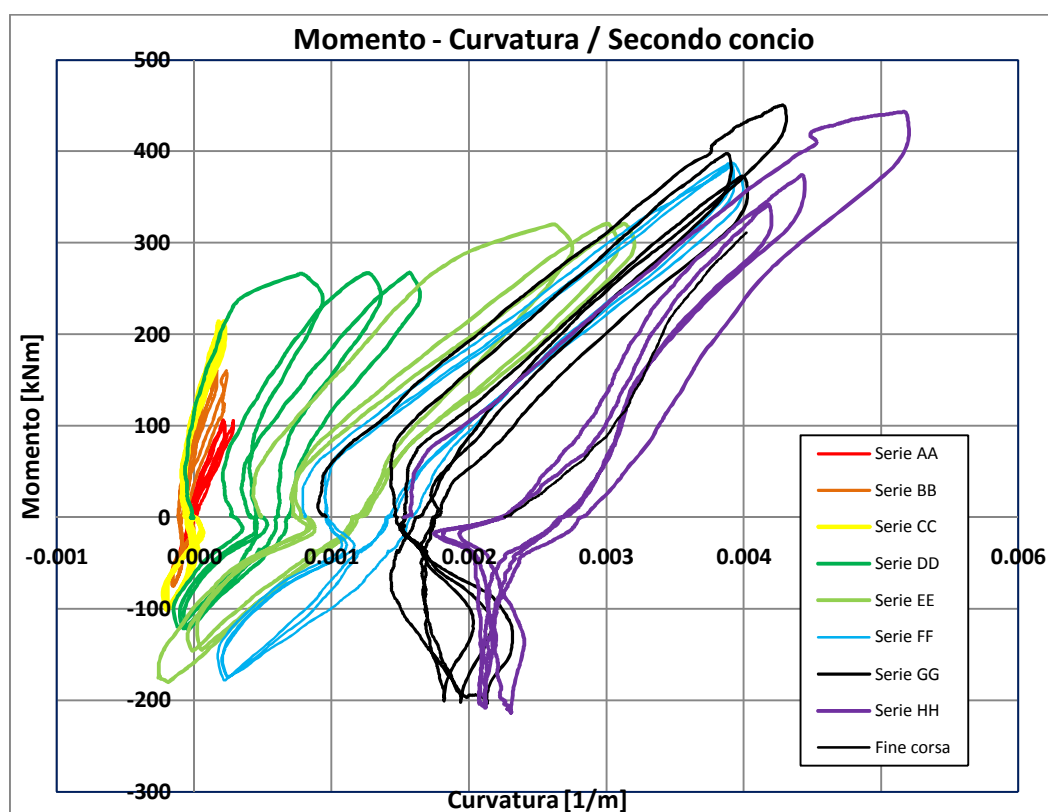
Per calcolare il momento flettente agente, ogni valore del carico del pistone viene moltiplicato per il braccio del concio, cioè la distanza tra il punto di applicazione della forza e la mezzeria del concio; per il secondo concio tale braccio risulta  $b_2=1,60m$ .

A partire dalla serie di carico GG, l'induttivo L5 fornisce valori non affidabili poiché l'adesione delle basette al nodo non è più efficace; dunque da quel momento, invece della media dei valori registrati da L5 e L7, si considera solo la misura effettuata da L7 maggiorata del 20% (come suggerisce l'andamento della media precedentemente al danneggiamento di L5).

A partire dal primo ciclo della serie di carico HH, durante il quale l'induttivo L7 subisce il distacco completo dalla struttura, si considera solo la misura effettuata da L7 maggiorata del 65%.

Inoltre per ottenere una migliore leggibilità dell'andamento delle curve, per le letture degli induttivi interessati è stato calcolata la media mobile a 10 punti.

Usando i parametri calcolati come illustrato precedentemente si ottiene il grafico momento-curvatura riportato in figura 9.7



- Figura 9.7 – Diagramma Momento-Curvature del 2°concio di trave.

Nello stesso modo in cui è stato calcolato il diagramma di figura 9.7 è possibile ottenere anche il diagramma momento-curvatura relativo al 3°concio di trave, rappresentativo dei 21cm successivi alla sezione terminale del 2°concio.

Gli induttivi a cui fare riferimento sono:

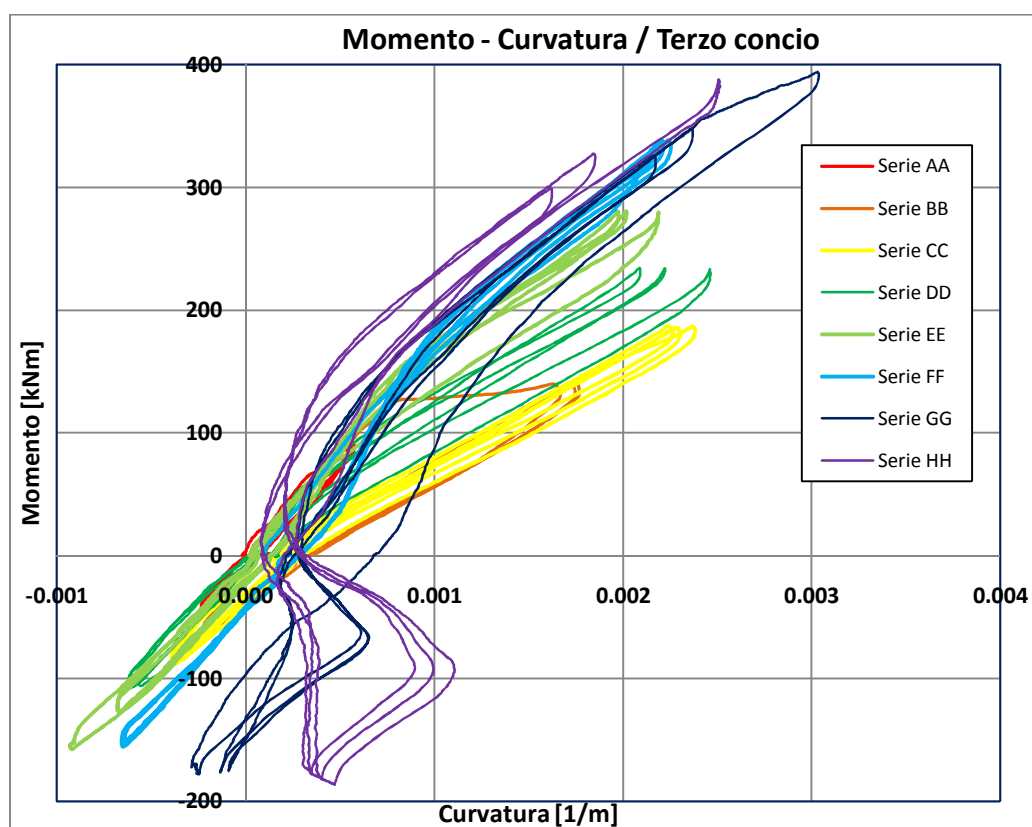
- L3 WA10-6: posto all’estradosso a battuta sulla sezione terminale del secondo concio;
- L8 WA10-5: posto all’intradosso della trave, in corrispondenza dell’asse della trave, a battuta sulla sezione terminale del secondo concio.

Calcolate le deformazioni medie, le curvatura media del terzo concio si calcola con la relazione:

$$\chi_3 = \frac{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{i3}}{h} = \frac{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e3}}{0,54} \frac{1}{m}$$

Per calcolare il momento flettente agente, ogni valore del carico del pistone viene moltiplicato per il braccio del concio, che per il terzo concio risulta  $b_3=1,40\text{m}$ .

Si ottiene così il diagramma momento-curvatura relativo al 3°concio di trave rappresentato in figura 9.8.



- Figura 9.8 – Diagramma Momento-Curvature del 3°concio di trave.

Per il 1° concio di trave, di cui si è rappresentato il diagramma momento-rotazione in figura 9.6, è comunque possibile, mediante le stesse relazioni utilizzate per il 2° e 3°concio, calcolare la curvatura e ottenere il diagramma momento-curvatura.

Ai fini sperimentali, risulta interessante confrontare i valori massimi di curvatura ottenuti nei tre concio di trave.

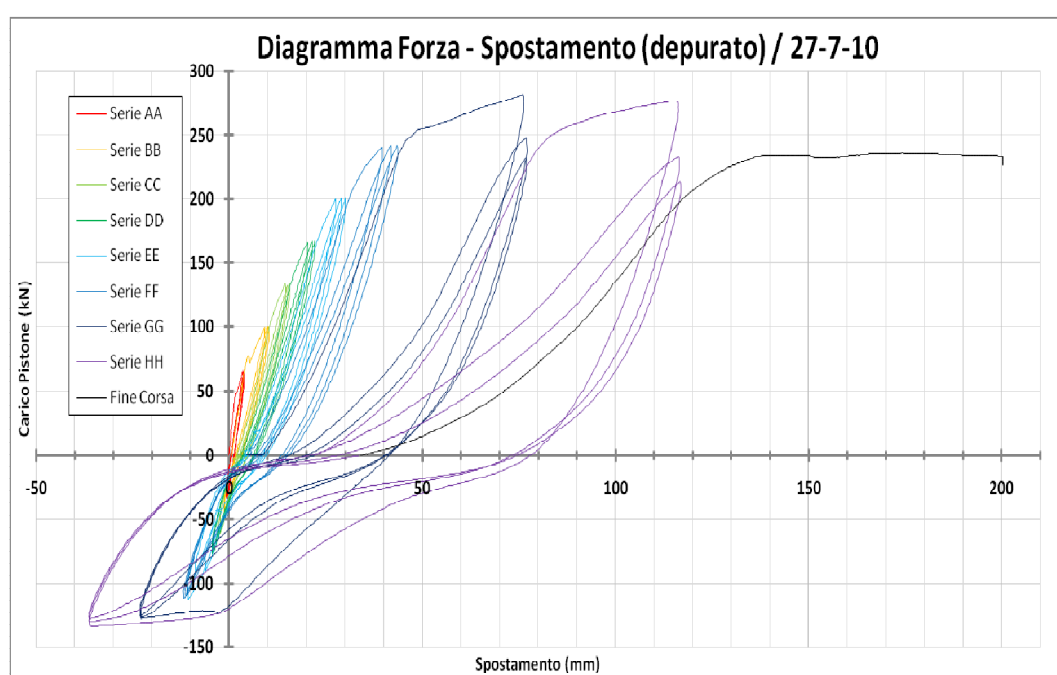
Per il primo concio il valore massimo di curvatura riscontrato è di circa  $0,4 \frac{1}{m}$  mentre le curve riferite al secondo e terzo concio registrano rispettivamente valori massimi intorno a  $0,005 \frac{1}{m}$  e  $0,003 \frac{1}{m}$ ; dunque i valori dei concio 2 e 3 sono inferiori di due ordini di grandezza rispetto a quelli relativi al primo. Si ha quindi una conferma numerica dell'ipotesi formulata in base al solo riscontro visivo sulla localizzazione della plasticizzazione del nodo nella sezione di innesto trave-pilastro.



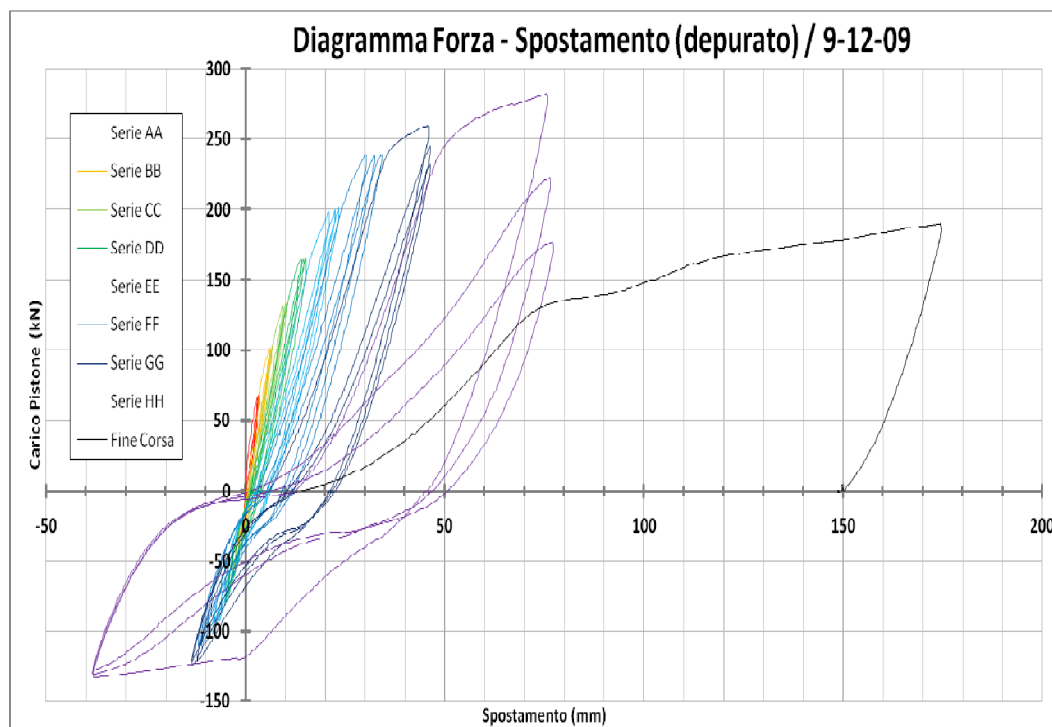
### 9.2.1 – Confronto dei grafici relativi al comportamento globale

In questo paragrafo si analizzano le principali differenze evidenziate nel confronto dei diagrammi relativi al comportamento globale della struttura, per la I e la II prova.

Di seguito sono riportati i diagrammi forza-spostamento relativi alle due prove. Il diagramma relativo alla prova in esame, già proposto nella figura 9.4 viene riportato nuovamente in figura 9.9 per essere confrontabile con la scale utilizzata per rappresentare il diagramma della I prova, riportato in figura 9.10.



- Figura 9.9 – Diagramma Forza-Spostamento II Prova.



- Figura 9.10 – Diagramma Forza-Spostamento I Prova.

Dal confronto operato tra il diagramma forza-spostamento riferito al test attuale (vedi fig. 9.9) e quello riferito al test svolto su un nodo a tre vie analogo nell'inverno del 2009 (vedi fig. 9.10) emergono le seguenti osservazioni:

- La plasticizzazione della struttura si colloca nei due casi nelle medesime condizioni in corrispondenza di un valore del carico pari a 250kN e di un valore di spostamento netto in sommità pari a 40mm;
- Il carico a rottura vale circa 230kN nel 2010 e circa 190kN nel 2009 (la deformazione a rottura viene imposta dal fine corsa del pistone, dunque non è particolarmente significativa);
- Nel 2010 viene indagata maggiormente la capacità dissipativa della struttura, poiché vengono imposte serie di carico in controllo di spostamento che consentono lo sviluppo di un campo plastico importante e danno prova di un'elevata duttilità della struttura.

I limiti di spostamento (positivi) imposti nelle serie di carico in controllo di spostamento sono riportati di seguito:

- Serie GG :      Prova 2009      =>      50mm;
- Prova 2010      =>      80mm;
- Serie HH :      Prova 2009      =>      80mm;
- Prova 2010      =>      120mm;

Nonostante il nodo del 2010 sia stato testato con spostamenti imposti maggiori, nella serie di carico protratta fino a fine corsa, è in grado di sviluppare una resistenza maggiore del nodo del 2009 (carico a rottura maggiore nel 2010);

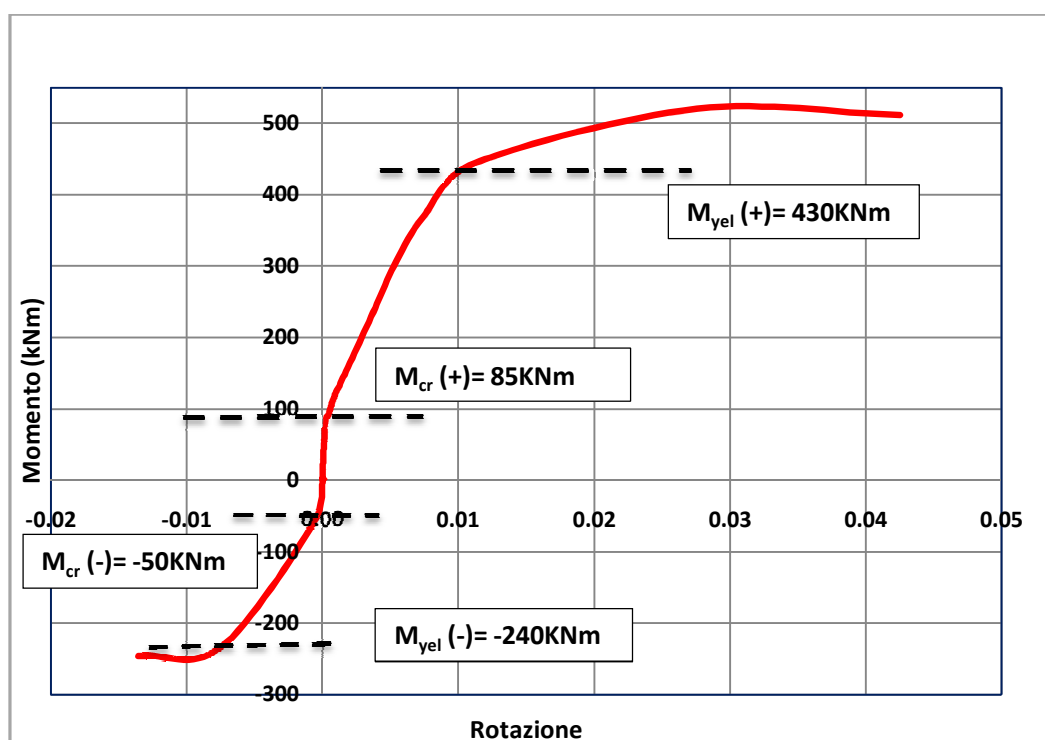
- Nel nodo del 2010 la resistenza flessionale si degrada lentamente mantenendosi elevata anche per elevati livelli di deformazione. Infatti per avere uno spostamento dell'estremità della trave pari a +120mm, il pistone deve imporre una forza pari a 275kN circa (primo ciclo di carico della serie HH). Invece il nodo del 2009 allo stesso valore di deformazione ha una resistenza minore, poiché il carico del pistone arriva solo fino a 170kN.

### 9.3 –Analisi globale del comportamento strutturale

Nei successivi punti di questo paragrafo si fornirà un'analisi più dettagliata in riferimento al comportamento globale della struttura sottoposta a prova ciclica, in termini di *resistenza, rigidezza e dissipazione energetica*.

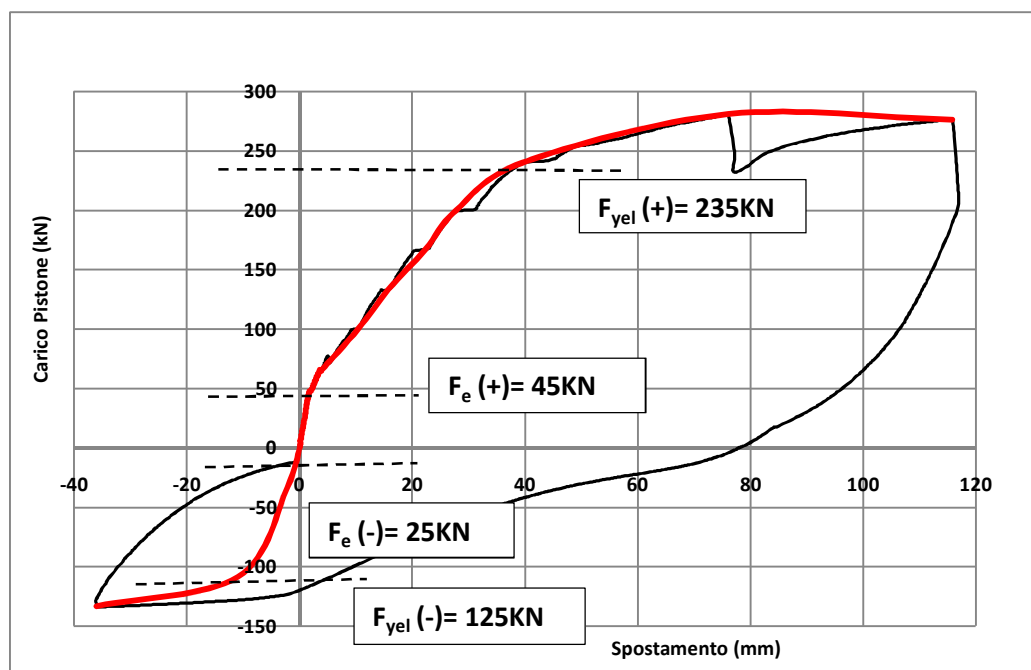
Nel comportamento globale della struttura è di fondamentale importanza l'individuazione del momento di fessurazione ( $M_{cracking}$ ) oltre a quello di snervamento ( $M_{yielding}$ ). La comparsa delle prime fessure ed il loro successivo ampliamento genera una significativa diminuzione della rigidezza con aumento delle deformazioni. Considerato che gran parte delle fessurazioni ha luogo in corrispondenza del primo concio della trave, risulta utile riproporre, come ulteriore strumento d'analisi, l'involuppo del legame momento-rotazione relativo al 1° concio di trave.

La rappresentazione fornita in figura 9.11 viene inoltre corredata dall'indicazione dei momenti di fessurazione ( $M_{cracking}$ ) e di snervamento ( $M_{yielding}$ ) positivi e negativi, direttamente connessi rispettivamente alle fasi di formazione delle fessure e del loro successivo ampliamento.



- Figura 9.11 – Diagramma Momento-Rotazione del 1° concio di trave e involucro

Quale ulteriore strumento d'analisi, si ripropone anche l'involuppo degli spostamenti dell'estremità libera della trave, computati al netto delle componenti di spostamento rigido; la rappresentazione fornita in figura 9.12 viene corredata, in analogia con quanto fatto per il legame  $M-\varphi$ , dall'indicazione delle azioni corrispondenti al limite elastico del comportamento strutturale ( $F_e$ ) ed al limite di snervamento ( $F_{yel}$ ).



- **Figura 9.12** – Involuppo del diagramma Forza-Spostamento della trave con relativa indicazione dei momenti di fessurazione e di snervamento.

Da un primo confronto tra il diagramma rappresentativo del legame momento-rotazione relativo al primo concio di trave (fig. 9.11) ed il diagramma rappresentativo del legame forza-spostamento relativo all'estremità della trave (fig. 9.12) risulta possibile rimarcare lo stretto rapporto che intercorre tra la deformazione locale del primo concio di trave e la deformazione globale della struttura di nodo. Considerando infatti le coppie flettenti che le azioni di prova, responsabili dello snervamento strutturale, generano in corrispondenza della sezione media del 1° concio di trave, si possono ritrovare proprio le coppie flettenti responsabili dello snervamento delle barre d'acciaio evidenziabile tramite il digramma  $M-\varphi$  (evidenziate con  $M_{yel}$  in fig. 9.11). Ricordando infatti che l'asse del pistone ha un braccio d'azione pari a  $b_1 = 1,85$  m rispetto alla sezione media del 1° concio di trave, si ha:

$$F_{yel}(+) \cdot b_1 = 235 \cdot 1,85 = 434,5 \text{ kNm} \cong M_{yel}(+)$$

$$F_{yel}(-) \cdot b_1 = 130 \cdot 1,85 = 240,5 \text{ kNm} \cong M_{yel}(-)$$



Inoltre ragionando in modo del tutto analogo anche per le coppie flettenti generate, in corrispondenza della sezione media del primo concio di trave, dalle azioni di prova che inducono il superamento del limite elastico strutturale (indicate con  $F_e$ ); dalle relazioni seguenti si può notare come si ottengano valori prossimi a quelli delle coppie flettenti localmente responsabili della fessurazione del primo concio di trave (evidenziati in fig. 9.11):

$$F_e(+) \cdot b_1 = 45 \cdot 1,85 = 83,25 \text{KNm} \cong M_{cr}(+)$$

$$F_e(-) \cdot b_1 = 25 \cdot 1,85 = 46,25 \text{KNm} \cong M_{cr}(-)$$

### 9.3.1 -Variazione delle resistenze

Per un'analisi del comportamento globale della struttura in termini di resistenza massima sviluppata si fa riferimento anzitutto alla curva di inviluppo dello spostamento netto subito dall'estremità della trave in funzione del carico di prova, rappresentata nella figura 9.12. Si nota come già per valori di carico positivi pari a circa 50 KN e negativi pari a circa 25 KN si abbandona l'andamento lineare, osservando invece un incremento più che proporzionale degli spostamenti d'estremità; giunti quindi ad un carico pari a 235 KN, per quanto riguarda i carichi di segno positivo, e pari a -125 KN, per quanto riguarda i carichi di segno negativo, si ha lo snervamento strutturale.

Il successivo aumento delle deformazioni vede comunque un incremento, seppur ridotto, dei carichi, raggiungendo il massimo valore positivo di 280 KN, e negativo di -130 KN; si denota pertanto un comportamento strutturale globale, in fase di deformazione plastica, di tipo duttile.

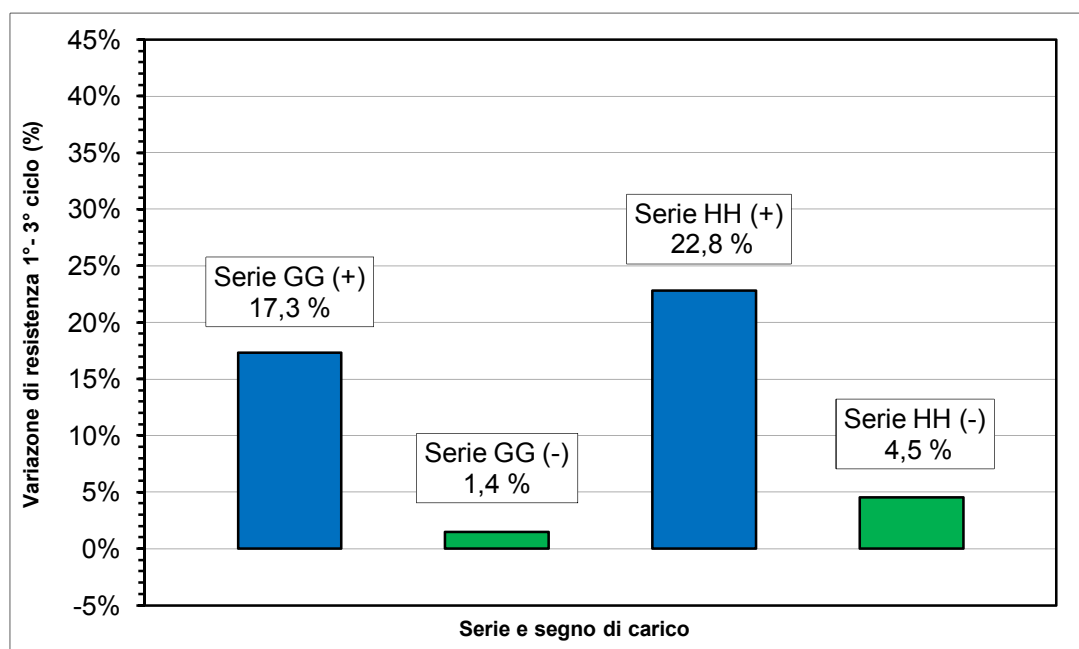
L'analisi dell'inviluppo dei valori massimi di carico supportati dalla struttura di nodo nel corso della prova ciclica fornisce un'indicazione delle *azioni massime supportabili in caso di sollecitazione sismica della struttura*.

Una più dettagliata analisi delle resistenze, limitata ai soli cicli della medesima serie di carico, consente inoltre di quantificare il degrado delle resistenze in funzione dell'azione ciclica del carico, fornendo quindi informazioni relative anche alla *resistenza della struttura in funzione della durata dell'azione sismica*.

L'analisi del degrado delle resistenze, relativo all'applicazione ciclica del carico, viene svolta con riferimento alle sole serie di carico condotte in controllo di spostamento (*serie GG* ed *HH*), poiché sono le uniche che consentono di registrare differenti valori di carico necessari a raggiungere una prefissata deformazione. Si procede determinando la variazione percentuale delle resistenze massime raggiunte in corrispondenza del 1° e del 3° ciclo della serie in esame, secondo la seguente relazione:

$$\Delta_{Res} = \frac{F_{max1^{\circ}CICLO} - F_{max3^{\circ}CICLO}}{F_{max1^{\circ}CICLO}} \cdot 100$$

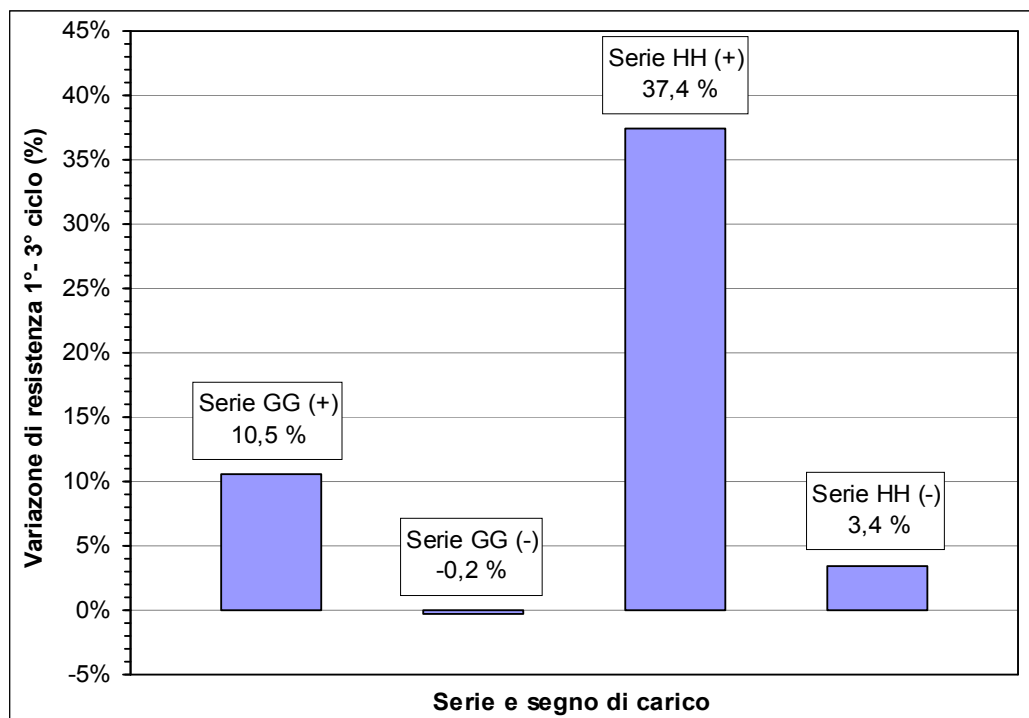
Procedendo in tal modo sia per i carichi di segno positivo che per quelli di segno negativo, relativi alle *serie GG* ed *HH*, si ottengono i valori riportati nell'istogramma di figura 9.13.



- **Figura 9.13** - Variazioni percentuali di resistenza massima verificatesi tra il 1° ed il 3° ciclo di carico relativi alle serie condotte in controllo di spostamento.

Si osserva anzitutto come la preponderanza dei carichi di segno positivo generi delle variazioni molto più accentuate rispetto a quelle evidenziate dai carichi negativi; nel corso della *serie GG* le diffuse plasticizzazioni delle armature integrative inducano una perdita ciclica di resistenza del 17,3 %, mentre nel corso della *serie HH* la perdita di resistenza risulta leggermente maggiore.

Risulta interessante confrontare i risultati ottenuti da questa analisi con quelli ottenuti nella I prova riportati nell'istogramma di figura 9.14.



- **Figura 9.14** - Variazioni percentuali di resistenza massima verificatesi tra il 1° ed il 3° ciclo di carico. I risultati sono relativi alla I prova.

Si nota come nella *serie HH* la perdita di resistenza era stata molto elevata (37,4%) superando di quasi quattro volte la perdita di resistenza verificatesi nella *serie GG*. Tale degrado era stato attribuito all'intervento degli scorrimenti delle barre integrative superiori, nel corso della *serie HH*.

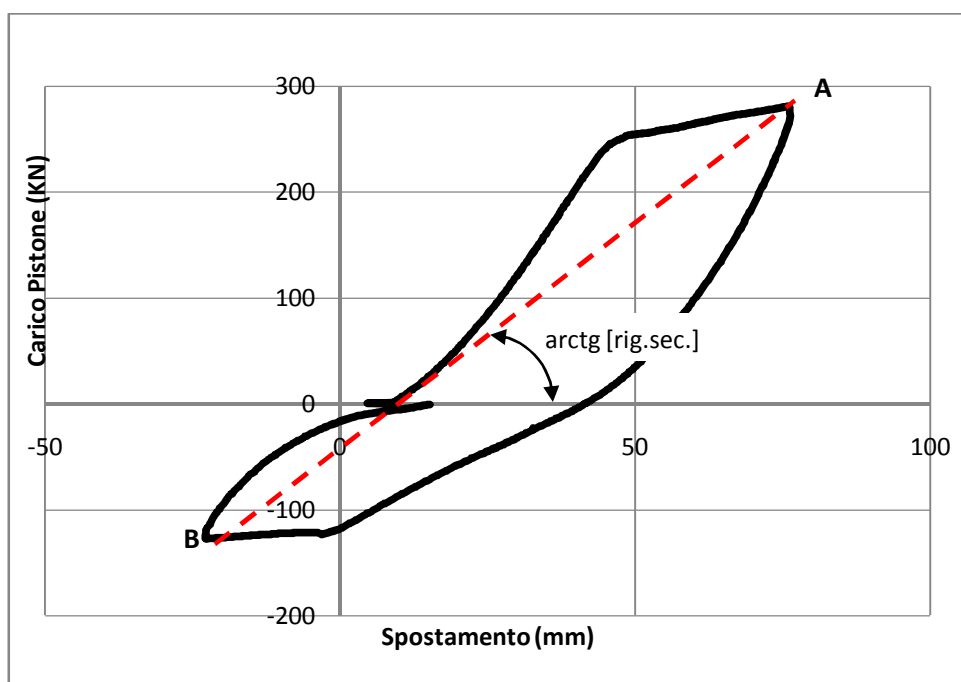
Nel corso della prova in esame invece, come si può notare nella figura 9.13, le perdite verificatesi nelle *serie GG ed HH* risultano paragonabili e dovute semplicemente alle diffuse plasticizzazioni delle armature integrative.

### 9.3.2 -Variazione delle rigidezze secanti

L'analisi delle rigidezze secanti relative alle varie serie di carico ed ai relativi cicli di ripetizione consente un'indagine ancora più approfondita degli effetti che i meccanismi resistenti locali inducono sul comportamento globale della struttura, consentendo di analizzare il degrado delle rigidezze relativo alle ripetizioni cicliche dei carichi delle serie condotte sia in controllo di forza che in controllo di spostamento.

La rigidezza secante considerata, relativa al generico ciclo di applicazione dell'azione di prova fa riferimento a entrambi i rami di carico e scarico ed è definita dal rapporto tra la

forza applicata e relativo spostamento massimo indotto. Lo schema di figura 9.15, relativo ad esempio al primo ciclo di carico della serie GG, fornisce una rappresentazione di quanto detto. Si può notare che tale definizione di rigidezza secante è influenzata dalla non simmetria delle azioni di carico positivo e negativo e dalla non simmetria strutturale derivante dalle differenti quantità di armatura superiori e inferiori. Tale definizione di rigidezza secante consente però di cogliere molto efficacemente il degrado delle rigidezze stesse nei differenti cicli di carico.



- **Figura 9.15** - Schema esemplificativo: rappresentazione grafica delle rigidezze secanti relative a un generico ciclo di carico.

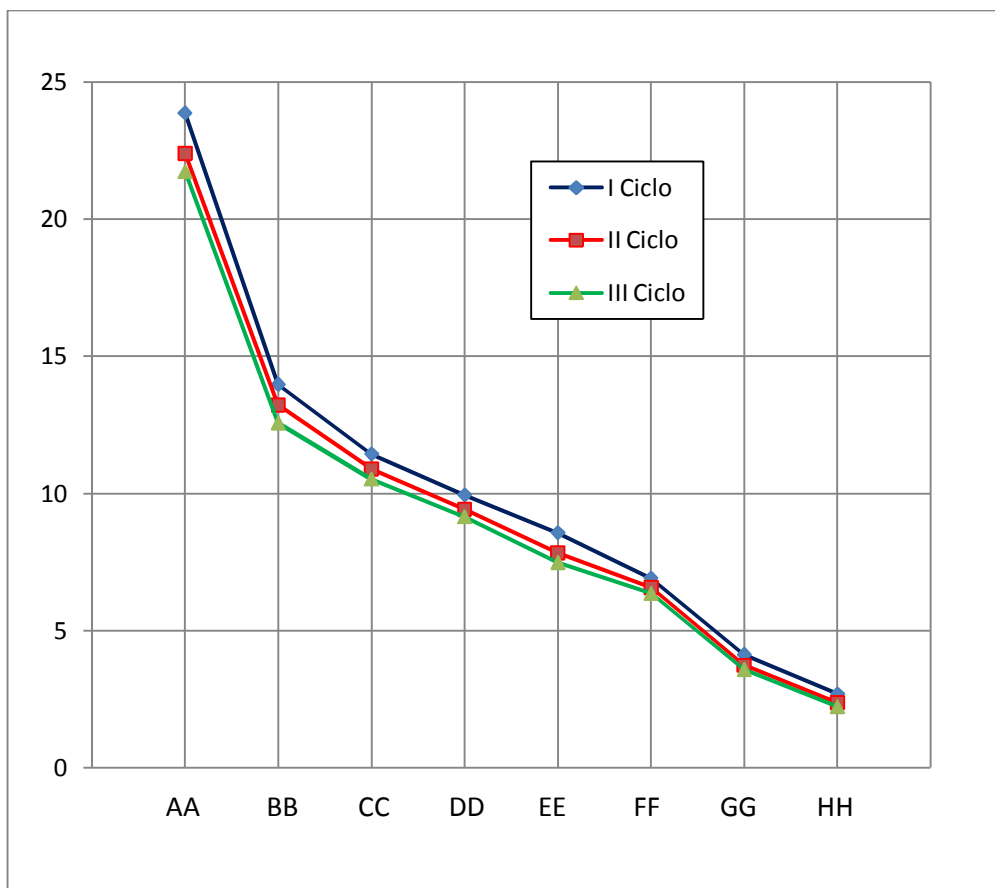
Il grafico di figura 9.16 rappresenta l'andamento delle rigidezze secanti in funzione delle varie serie di carico e dei cicli di ripetizione. Analizzando anzitutto la variazione seriale delle rigidezze, si può notare come la riduzione sia più marcata nel corso delle prime serie di carico (AA-CC) e in particolare nelle prime due (AA-BB), durante le quali, sia in corrispondenza del pannello di nodo che del primo tratto di trave, si ha la formazione delle prime fessure (vedi grafici di fig. 9.11 e 9.12). Nel corso delle serie successive (DD-FF) il calo delle rigidezze subisce un assestamento, poiché la formazione delle fessure si arresta, mentre si assiste all'ampliamento delle fessure già presenti (in parte osservabili

anche ad occhio nudo sulla superficie del getto). Si osserva inoltre che l'ampia deformazione osservata nel corso delle ultime tre serie di carico (*FF-HH*) viene compensata, in termini di rigidezza, dal ridotto incremento di carico corrispondente, sottolineando nuovamente come la struttura giunga al collasso con un comportamento tutto sommato duttile.

Analizzando quindi il degrado ciclico delle rigidezze, si nota in genere come la rigidezza secante tenda costantemente a diminuire e al termine della *serie CC* la rigidezza della struttura ha già subito una riduzione superiore, in media, al 50 % del valore iniziale come si vede dalla tabella di figura 9.17.

Successivamente le diffuse plasticizzazioni delle barre integrative superiori provoca, in corrispondenza di ogni ciclo delle *serie FF-HH*, un evidente degrado ciclico delle rigidezze in particolare nella *serie GG* in cui avviene lo snervamento, si nota infatti nel passaggio dalla *serie FF* alla *serie GG* una riduzione di rigidezza notevole; la rigidezza passa infatti da 6,9KN/mm a 4,1KN/mm con una riduzione di circa il 40%.

Nel 2° e 3° ciclo della *serie HH*, che fanno riferimento alla formazione della cerniera plastica in corrispondenza della sezione di collegamento della trave, si evidenzia una riduzione di circa il 90 % del valore iniziale della rigidezza, passando dai 23,8 KN/mm della *serie AA* ai circa 2,3 KN/mm degli ultimi due cicli della *serie HH*.



- **Figura 9.16** – Andamento delle rigidezze secanti in funzione della serie di carico e del ciclo di ripetizione.

Si nota, infine, come le rigidezze relative al 1°ciclo di ciascuna serie risultino sempre maggiori di quelle delle serie successive a sottolineare come il degrado causato da ciascun incremento di carico si sia poi tradotto in una minore rigidezza nella serie successiva

La tabella di figura 9.17 riporta le variazioni percentuali delle rigidezze secanti medie di ogni serie di carico. Tali variazioni sono calcolate sia rispetto alla serie precedente che rispetto alla serie di carico iniziale.



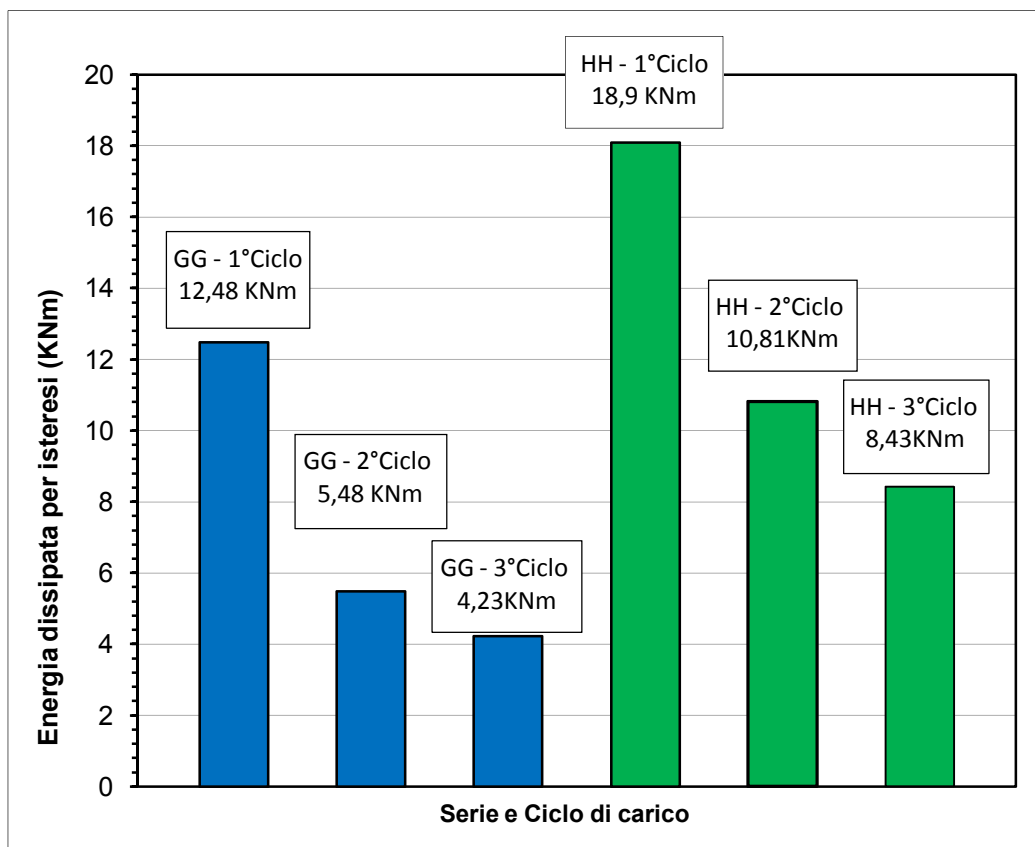
	Var. % rispetto alla serie prec.	Var. % rispetto alla serie AA
<b>AA</b>	-	-
<b>BB</b>	41.4%	41.4%
<b>CC</b>	18.2%	52.1%
<b>DD</b>	13.0%	58.3%
<b>EE</b>	13.9%	64.1%
<b>FF</b>	19.4%	71.1%
<b>GG</b>	40.3%	82.7%
<b>HH</b>	34.7%	88.7%

- **Figura 9.17** – Andamento delle rigidzze secanti in funzione della serie di carico e del ciclo di ripetizione.

### 9.3.3 – Energia dissipata

La valutazione delle dissipazioni energetiche della struttura di collegamento nel corso del caricamento ciclico di prova è un importante parametro di valutazione di quella che sarà poi il la *capacità dissipativa della struttura reale sottoposta all'azione ciclica di un sisma*. Come già osservato in occasione dell'analisi del degrado delle resistenze, le serie di carico condotte in controllo di spostamento (*serie GG ed HH*) risultano essere le più idonee ad una valutazione delle dissipazioni cicliche.

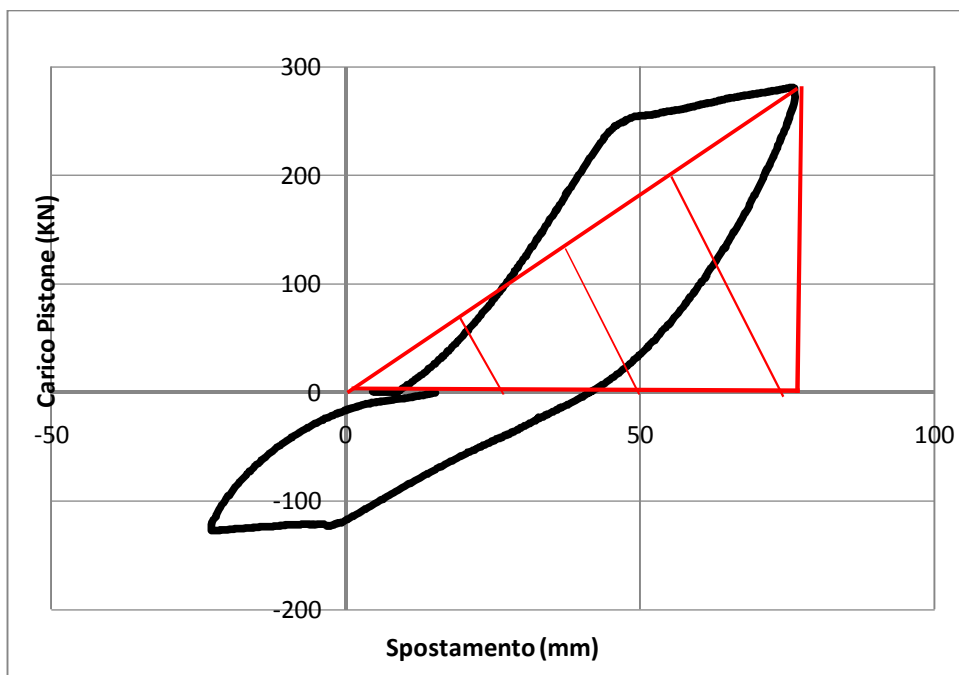
L'istogramma rappresentato in figura 9.18 riporta i valori delle dissipazioni energetiche prodotte per isteresi ciclica dalla struttura di nodo; la loro valutazione è stata effettuata con l'ausilio del diagramma che rappresenta il legame tra carico applicato al pistone e spostamenti netti rilevati all'estremità trave (riportato al punto 9.2, fig. 9.4), calcolando l'area racchiusa all'interno di ogni curva relativa ad un ciclo completo di carico.



- **Figura 9.18** – Energia dissipata per isteresi nel corso delle serie di carico GG e HH.

Per analizzare meglio i dati forniti nell'istogramma di figura 9.18 si ritiene opportuno introdurre un *indice di dissipazione isteretico* ( $D_i$ ) definito come rapporto dell'energia dissipata in ogni ciclo dal collegamento strutturale con il doppio dell'energia elastica, computata come il prodotto dell'azione rilevata alla cella di carico per lo spostamento correlativo indotto all'estremità della trave.

Nella figura 9.19 si riporta ad esempio il primo ciclo di carico della *serie GG*; l'area racchiusa dalla curva nera rappresenta l'energia dissipata per isteresi ciclica; l'area tratteggiata in rosso rappresenta invece l'energia elastica per quel determinato ciclo di carico.



- **Figura 9.19** – Energia dissipata per isteresi ciclica nel corso del I ciclo della serie di carico GG ed energia elastica relativa allo stesso ciclo di carico.

Nella tabella di figura 9.20 sono riportati, per ciascun ciclo delle *serie* di carico GG e HH, l'energia dissipata, l'energia elastica e l'indice di dissipazione. Come si nota già dal primo ciclo della *serie* GG le diffuse plasticizzazioni hanno portato ad avere un indice di dissipazione superiore al 50%. Si può osservare infine come nel corso di entrambe le serie sia preponderante la dissipazione relativa al 1° ciclo di carico: nel corso della *serie* GG la capacità dissipativa subisce una riduzione del 52 % passando dal 1° al 2° ciclo di carico, mentre nel corso della *serie* HH tale riduzione è meno marcata, raggiungendo il 32 %.

Nel corso del 1° ciclo della *serie* GG la plasticizzazione delle armature integrative, più estesa in corrispondenza delle barre superiori, subisce un'apprezzabile diffusione, rimarcata solo in parte dai due successivi cicli di carico; tale fatto rappresenta, probabilmente, una conseguenza diretta del cinematismo acquisito dalla trave a causa dell'ampliamento della circoscritta fessurazione d'estradosso.

Nel corso della *serie* HH il deciso ampliamento delle plasticizzazioni nelle armature integrative consente la formazione della cerniera plastica all'estremità della trave.

II PROVA		Energia Dissipata(E)	Energia elastica( $\Phi$ )	Indice di dissipazione ( $E/2\Phi*100$ )
		KNm	KNm	
GG	1°Ciclo	12.48	10.73	<b>58.14%</b>
GG	2°Ciclo	5.48	9.58	<b>28.59%</b>
GG	3°Ciclo	4.23	8.95	<b>23.62%</b>
HH	1°Ciclo	18.09	16.09	<b>56.22%</b>
HH	2°Ciclo	10.81	13.62	<b>39.67%</b>
HH	3°Ciclo	8.43	12.48	<b>33.77%</b>

- **Figura 9.20** – Energia dissipata per isteresi ciclica, energia elastica e indice di dissipazione per la prova in esame (II Prova).

Nella tabella di figura 9.21 sono riportati i valori dell'energia dissipata e il relativo indice di dissipazione per la prova effettuata nel Dicembre 2009. Si nota come i valori dell'indice di dissipazione per la *serie GG* siano maggiori per la prova in esame specialmente se consideriamo il 1°ciclo di carico; per la *serie HH* invece, si ottengono valori lievemente maggiori per la I prova.

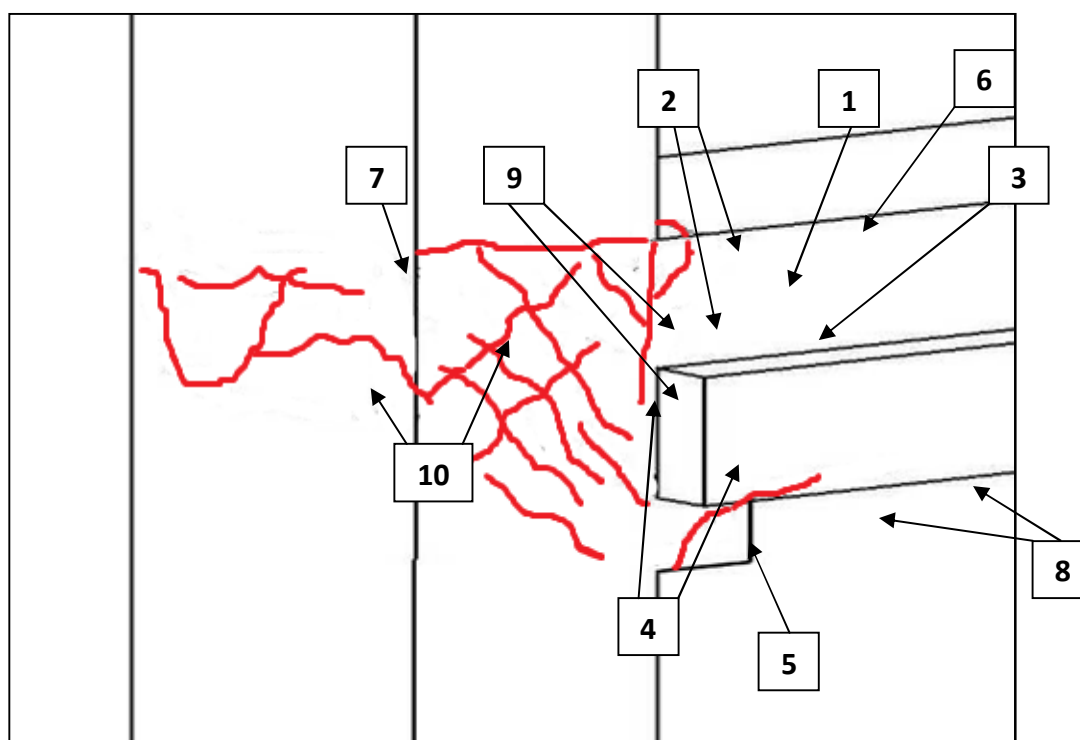
I PROVA		Energia Dissipata(E)	Energia elastica( $\Phi$ )	Indice di dissipazione ( $E/2\Phi*100$ )
		KNm	KNm	
GG	1°Ciclo	4.27	5.98	<b>35.70%</b>
GG	2°Ciclo	2.25	5.70	<b>19.74%</b>
GG	3°Ciclo	1.92	5.40	<b>17.79%</b>
HH	1°Ciclo	13.52	11.08	<b>61.01%</b>
HH	2°Ciclo	8.58	8.73	<b>49.17%</b>
HH	3°Ciclo	6.97	6.98	<b>49.96%</b>

- **Figura 9.21** – Energia dissipata per isteresi ciclica, energia elastica e indice di dissipazione (I Prova).

## 9.4 – Analisi locale del comportamento strutturale

Nel presente paragrafo si utilizzeranno i dati di prova, registrati ed elaborati, e le relative rappresentazioni grafiche realizzate al fine di analizzare, nel dettaglio, il comportamento strutturale del nodo a tre vie sottoposto a prova di carico ciclico; si effettuerà inoltre un loro raffronto con le osservazioni macroscopiche e le immagini raccolte durante la prova al fine di confermare od approfondire i differenti meccanismi resistenti posti in evidenza.

L'ordine che si è scelto di seguire nell'analizzare il comportamento dei vari elementi, rispetta la cronologia delle osservazioni che è stato possibile effettuare ad occhio nudo durante l'applicazione dei cicli di carico. Lo schema semplificato riportato in figura 9.22 consente di evidenziare ed enumerare la sequenza delle fessurazioni.



- **Figura 9.22** – Schematizzazione della fessurazione del nodo e numerazione dell'ordine cronologico di apparizione.

### 9.4.1 – Pannello di nodo

Il nodo di collegamento è una zona diffusiva di carico attraverso la quale le sollecitazioni, che la trave riceve dal pistone, vengono trasmesse alle porzioni superiore ed inferiore del pilastro; queste ultime, a loro volta, restituiscono al nodo le reazioni vincolari esercitate dalle strutture di contrasto, responsabili dell'equilibrio globale della struttura. Inoltre, nel caso in esame di collegamento d'estremità tra trave e pilastro, il nodo risulta essere anche sede dell'intero ancoraggio degli spezzoni integrativi di collegamento della trave, superiori ed inferiori. Per questi motivi ricostruire in modo chiaro ciò che avviene nel pannello di nodo durante la prova ciclica è molto complicato. In questo paragrafo si cercherà, tramite le letture effettuate dagli induttivi e dagli estensimetri, di evidenziare gli aspetti più significativi.

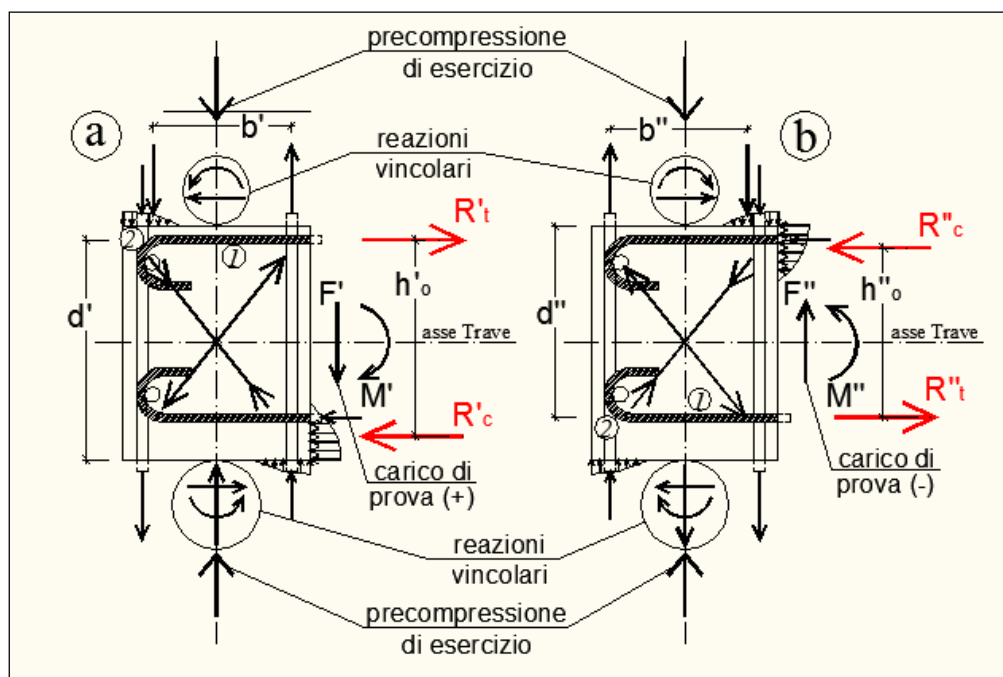
Il complesso delle sollecitazioni agenti sull'elemento di nodo può essere schematizzato come in figura 9.23, dove la coppia trasmessa dalla trave al nodo di collegamento risulta  $M' = F' \cdot b$ , nel caso di azione di carico positiva, e  $M'' = F'' \cdot b$ , nel caso di azione di carico negativa, essendo  $b = 180$  cm il braccio d'azione dell'asse del pistone rispetto alla sezione di collegamento della trave.

Le risultanti di trazione e compressione, relative alla sezione di collegamento alla trave ( $R'_t$ ,  $R''_t$  ed  $R'_c$ ,  $R''_c$  in fig. 9.23), risultano essere le sollecitazioni più incisive sullo stato tensionale del nodo, sia perché dovendo equilibrare la coppia generata dal pistone di spinta, disponendo di un braccio di coppia interna piuttosto piccolo, assumono valori rilevanti, sia perché il nodo di collegamento, in quanto elemento tozzo, risulta maggiormente vulnerabile alle sollecitazioni taglianti. Le risultanti di trazione, in modo particolare, vengono equilibrate dall'ancoraggio d'estremità delle barre integrative realizzato sul lato esterno del nodo mediante piegatura e spezzoni trasversali di contrasto (vedi dettagli costruttivi al capitolo 2), generando importanti trasferimenti di tensioni di trazione per aderenza al conglomerato circostante al tratto orizzontale dell'ancoraggio (*zona 1* nello schema di fig. 9.23), e di compressione alla sommità del puntone diagonale di conglomerato che fa capo alle piegature d'ancoraggio delle barre (*zona 2* nello schema di fig. 9.23).

Dato che il valore massimo del carico di prova applicato dal pistone in fase spinta (schema b di fig. 9.23) risulta essere 0,45 volte quello applicato in fase di trazione (schema a di fig. 9.23), la condizione di carico relativa allo schema a di fig. 9.23 risulterà la più sfavorevole per il nodo in esame; in particolar modo la trazione diagonale indotta

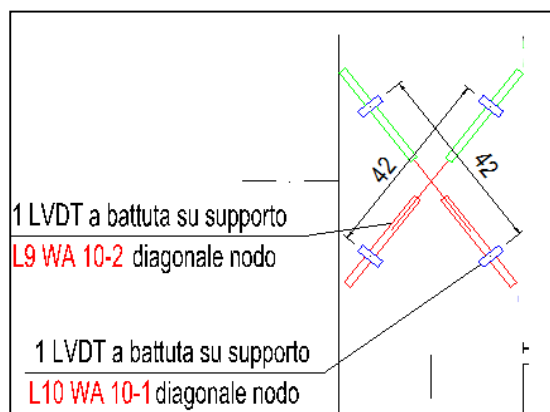


nel pannello di nodo nel caso dello schema a, con carico positivo (vedi convenzioni fig. 9.1), risulterà preponderante rispetto alla trazione relativa allo schema b, con carico di segno negativo.



- Figura 9.23 – Schematizzazione delle risultanti di carico agenti sul nodo.

In figura 9.25 vengono riportate le letture effettuate dai due trasduttori induttivi, L9 ed L10, posti sulle diagonali di nodo (come indicato nella figura 9.24); tali letture vengono rappresentate in funzione dell'azione applicata dal pistone nell'arco delle prime sei serie di carico (AA-FF), e nel rispetto delle convenzioni di figura 9.1.



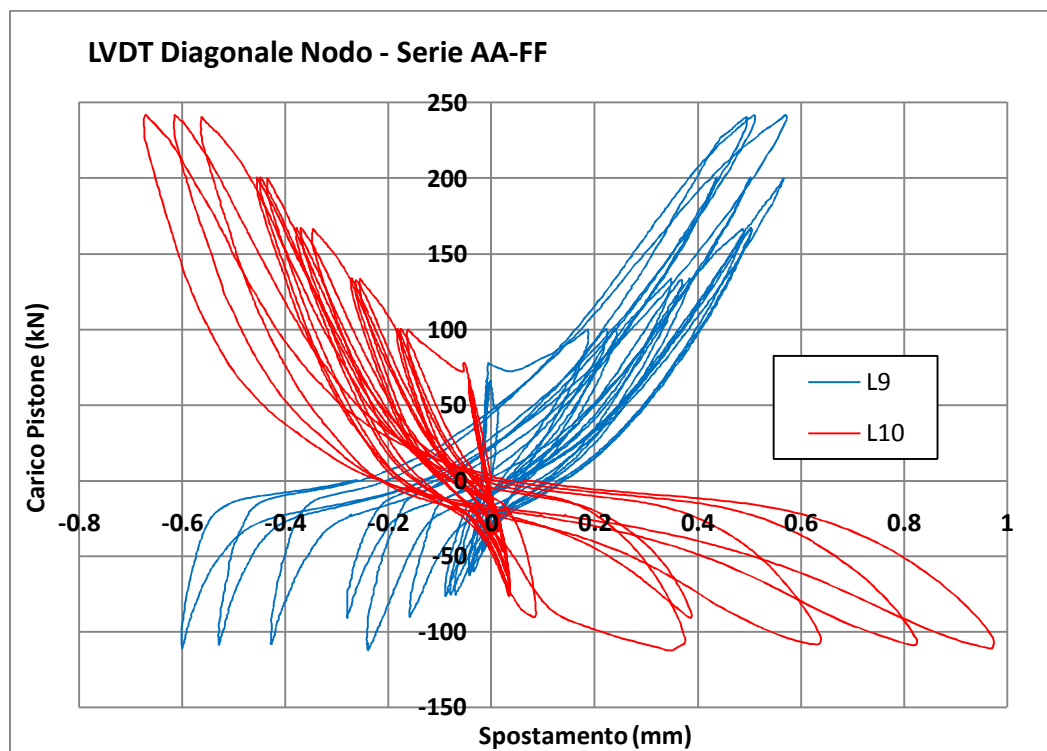
- **Figura 9.24** – Posizione degli induttivi sulle diagonali del nodo.

Analizzando l'andamento riportato nel grafico, si nota un graduale aumento delle deformazioni all'aumentare del carico, tali deformazioni rimangono comunque di ampiezza relativamente contenuta durante le prime sei serie di carico. In corrispondenza del 1° ciclo della serie BB si nota un tratto quasi orizzontale registrato da entrambi gli induttivi, particolare evidenziato nel grafico di figura 9.26, tale tratto corrisponde all'apertura di una fessura, in particolare della fessura indicata con **2** nella figura 9.22 che risulta visibile anche macroscopicamente nell'immagine di figura 9.27

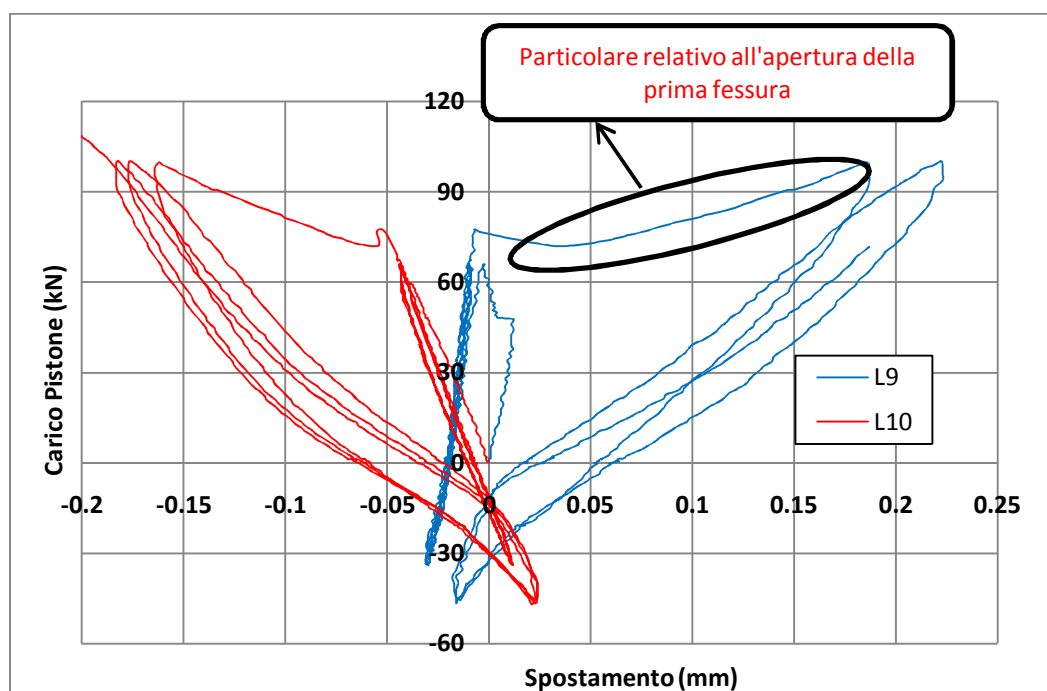
Al crescere del carico, e quindi all'aumentare delle sollecitazioni agenti sulle diagonali di nodo, le letture effettuate dagli induttivi evidenziano incrementi deformativi dovuti alla formazione di nuove fessure e all'ampliamento di quelle già presenti. Sulla diagonale parallela all'induttivo L10, al crescere del carico di segno positivo, si creano nuove fessurazioni sempre parallele alla biella compressa del traliccio di nodo (visibili nell'immagine di figura 9.28), mentre le fessure già formatesi si ampliano. Sulla diagonale parallela all'induttivo L9, durante la serie di carico FF, appare la prima fessura che tende ad ampliarsi nell'arco dei cicli successivi.

Tali fenomeni risultano ben visibili dal diagramma rappresentato in figura 9.25; le curve relative ad L9 evidenziano l'ampliarsi delle fessurazioni prodotte dal carico di segno positivo, mentre in corrispondenza dell'inversione del carico, e quindi dell'inversione delle sollecitazioni applicate sulle diagonali, i tratti orizzontali, presenti sia in L9 che L10, denotano gli scorrimenti relativi alla chiusura di tali fessure con un successivo forte aumento di pendenza delle curve; queste deformazioni si verificano sia in accorciamento

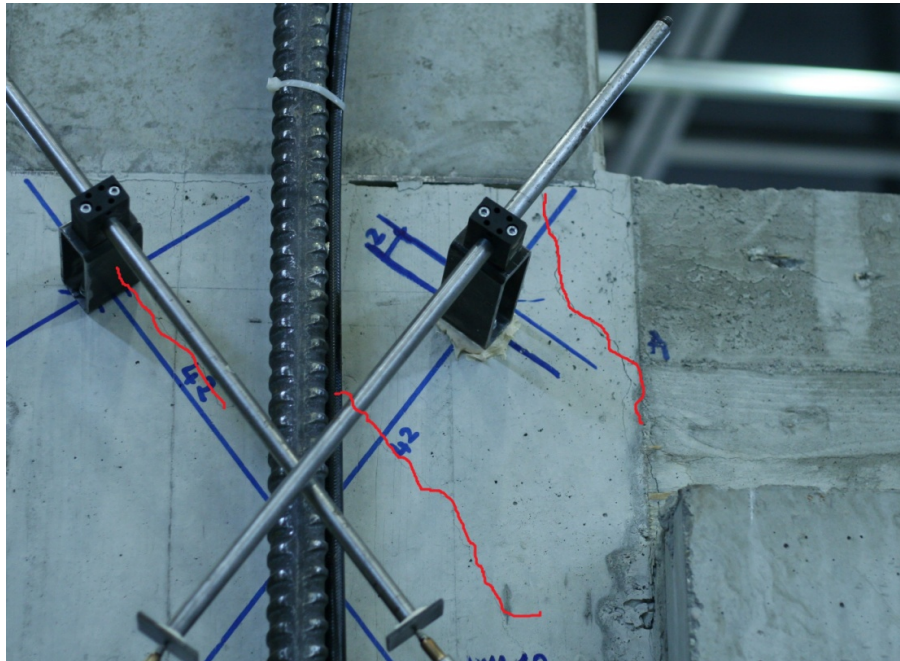
sulla diagonale compressa , sia in allungamento su quella tesa, provocando nel complesso uno scorrimento orizzontale della sommità del pannello di nodo.



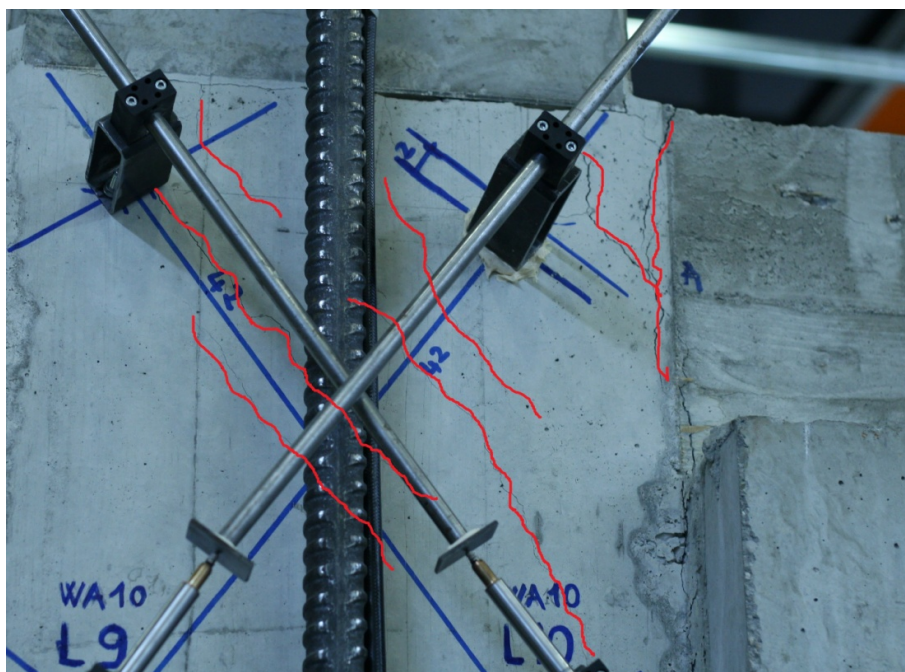
- **Figura 9.25** – Deformazioni registrate dagli induttivi posti sulle diagonali del nodo in funzione del carico applicato. Serie AA-FF



- **Figura 9.26** – Particolare delle deformazioni registrate dagli induttivi posti sulle diagonali del nodo in funzione del carico applicato. Serie AA-BB



- **Figura 9.27** – Quadro fessurativo del pannello di nodo dopo la serie di carico CC

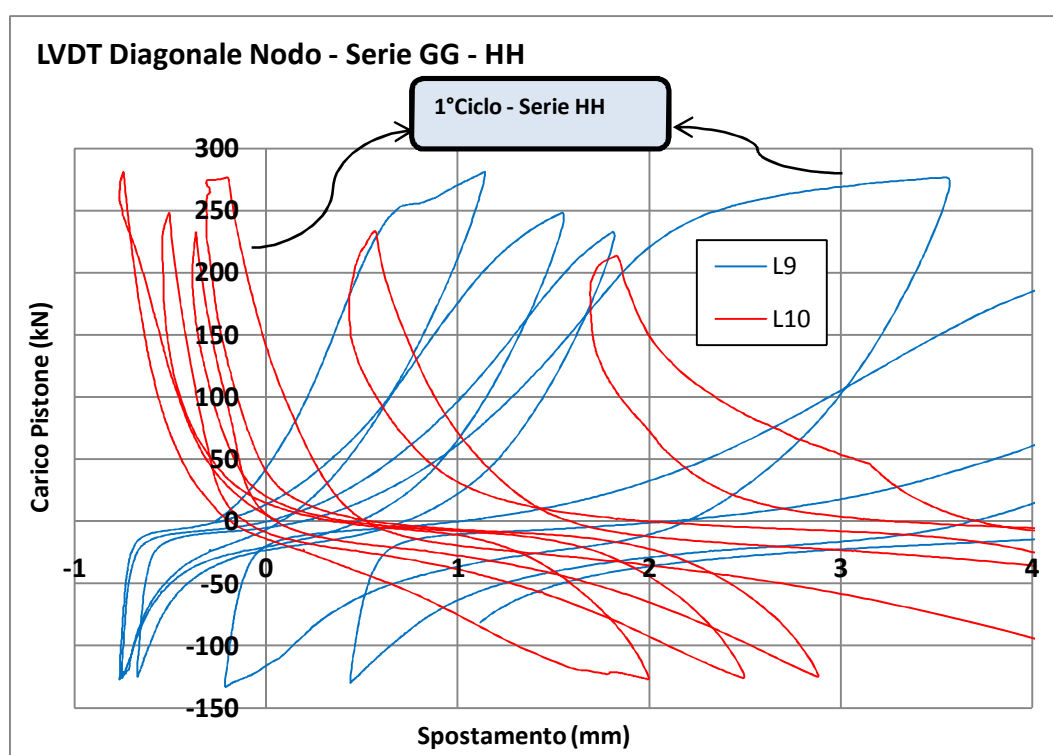


- **Figura 9.28** – Quadro fessurativo del pannello di nodo dopo la serie di carico EE

Il grafico di figura 9.29 riporta le letture degli induttivi effettuate durante le ultime due serie di carico (GG-HH). Nel corso della serie di carico GG, a causa dell'aumento del carico negativo, si sono formate numerose fessure anche nella direzione parallela a L9 (visibili nell'immagine di figura 9.30). Tale quadro fessurativo ha portato a un marcato aumento delle deformazioni rilevate dagli induttivi.

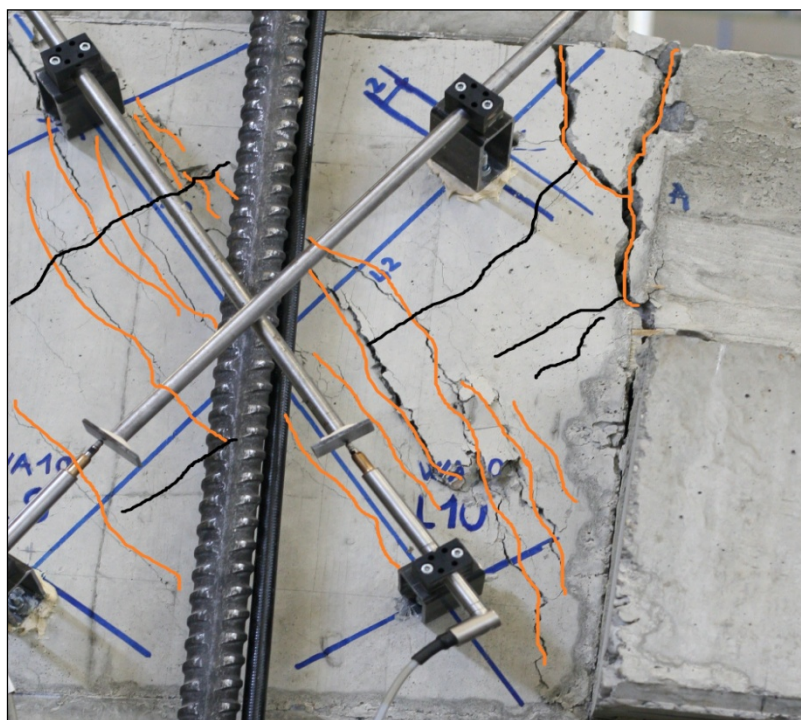
Nel corso della serie di carico HH, la crisi a taglio del pannello di nodo ha portato al distacco e allo sgretolamento di gran parte del calcestruzzo appartenente copriferro del pannello causando il distacco prima parziale e poi totale degli induttivi, come si vede nell'immagine di figura 9.31.

Purtroppo non è stato possibile analizzare in maniera più approfondita ciò che è avvenuto nelle ultime due serie di carico e in genere nel pannello di nodo a causa della mancanza di estensimetri sulle staffe del nodo.

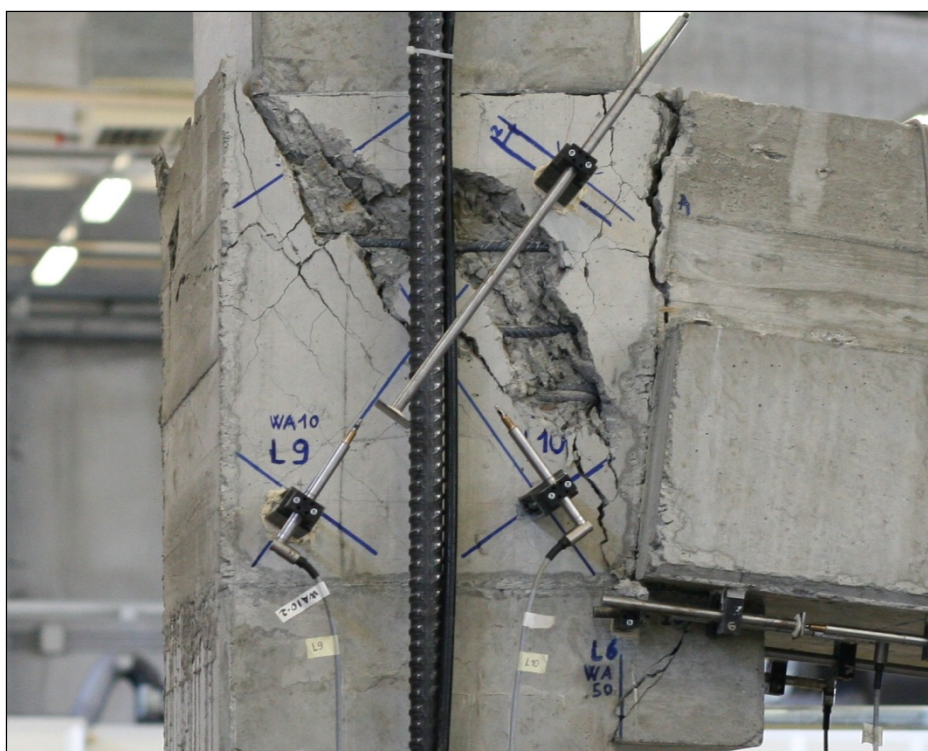


- Figura 9.29 – Deformazioni registrate dagli induttivi posti sulle diagonali del nodo in funzione del carico applicato. Serie GG-HH





- **Figura 9.30** – Quadro fessurativo del pannello di nodo dopo la serie di carico GG. In rosso le fessure parallele a L10 in nero le fessure parallele a L9.



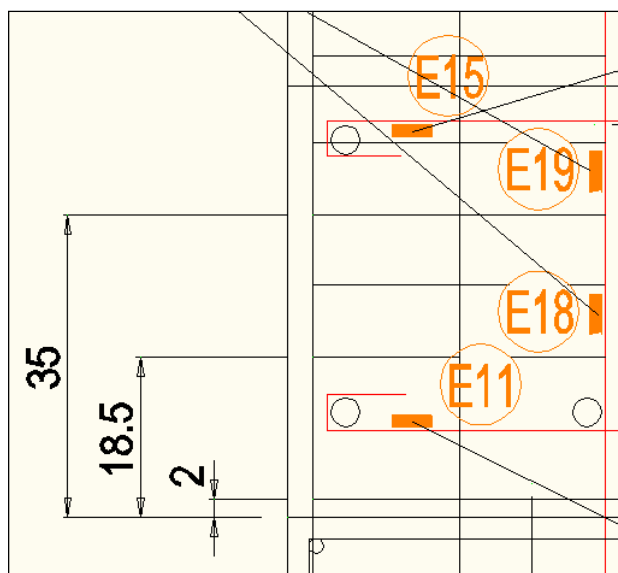
- **Figura 9.31** – Quadro fessurativo del pannello di nodo dopo la serie di carico HH.



### 9.4.2 – Barre longitudinali di nodo

Allo scopo di completare il quadro descrittivo dei meccanismi resistenti che si sono verificati all'interno del nodo di collegamento e per cercare di trovare ulteriori conferme alle riflessioni fin'ora svolte, si procede analizzando lo stato deformativo relativo alle porzioni di barre longitudinali del pilastro interessate dall'innesto di collegamento della trave.

Le rilevazioni di cui si dispone sono state effettuate dagli estensimetri E18 ed E19, applicati sul fianco della barra longitudinale centrale del pilastro; tali strumenti, predisposti al monitoraggio del nodo di collegamento, sono stati posizionati rispettivamente tra la terza e la quarta staffa (E18) e tra la prima e la seconda staffa (E19) come si vede dalla figura 9.32.

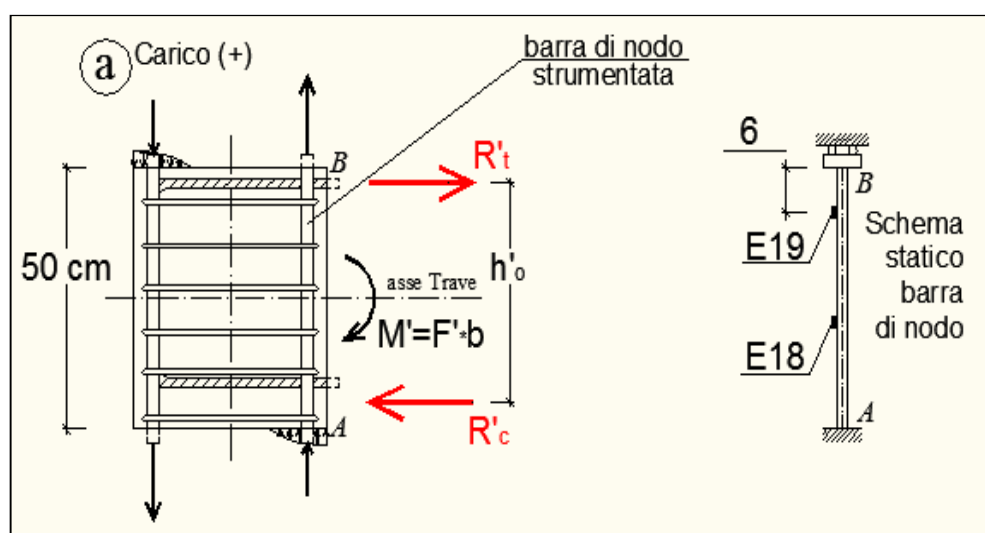


- **Figura 9.32**– Posizionamento degli estensimetri E18 ed E19 all'interno del nodo di collegamento.

Il sistema di connessione in esame prevede la prefabbricazione del pilastro con la creazione di un'interruzione di getto in grado di accogliere le armature ed il conglomerato di completamento; le barre longitudinali del pilastro risultano pertanto ancorate, nei tratti superiori ed inferiori nel calcestruzzo di prefabbricazione, avente classe di resistenza  $C40/50$ , mentre per i restanti 50 cm, relativi al nodo di collegamento, vengono inglobate nel conglomerato integrativo (di classe  $C25/30$ ), avente caratteristiche meccaniche inferiori. La barra di nodo risulta pertanto schematizzabile, come rappresentato in figura 9.33 mediante un sistema di vincolo a doppio incastro scorrevole ed un sistema di carico costituito da azioni assiali, derivanti dalle

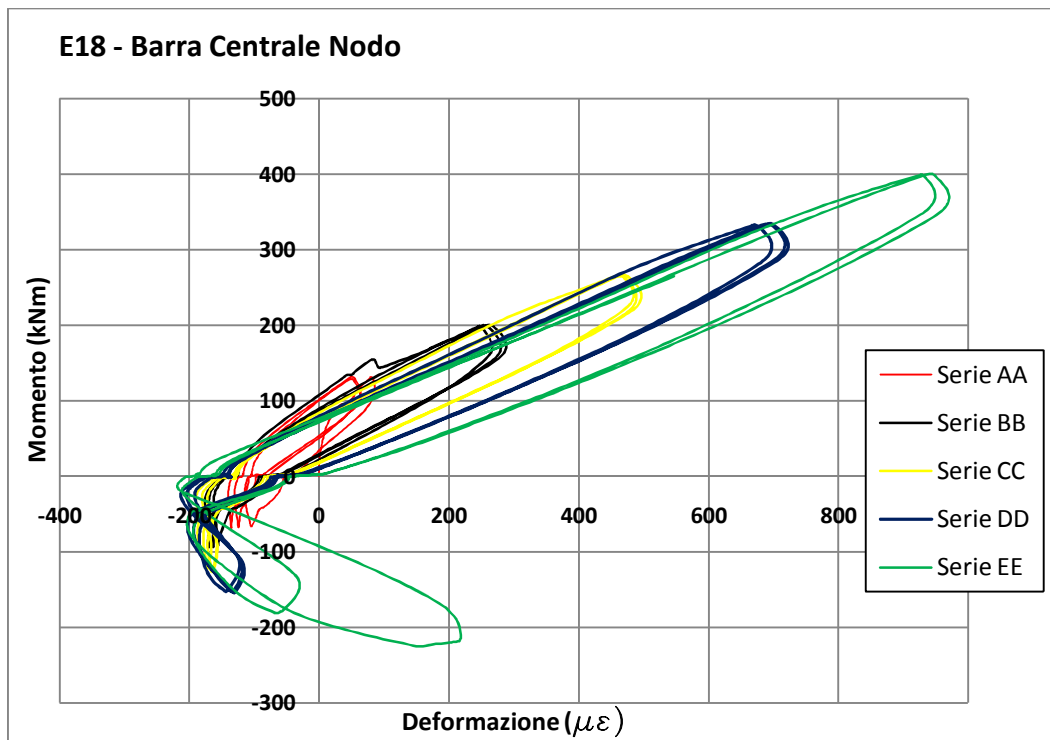
sollecitazioni flessionali trasmesse dalle due porzioni di pilastro, e da azioni trasversali, frutto della ripartizione delle azioni taglianti di nodo. La deformazione della singola barra longitudinale risulterà quindi caratterizzata da: *spostamenti trasversali* e *deformazioni assiali*, frutto dello scorrimento a taglio del pannello di nodo; *deformazioni assiali*, prodotte dalle risultanti derivanti dalle sollecitazioni flessionali trasmesse dal pilastro; *rotazioni d'estremità*, indotte dalla deformazione flessionale delle sezioni estreme di collegamento del pilastro al nodo.

Gli estensimetri in questione sono stati posizionati sul fianco della barra longitudinale del pilastro e quindi sulla faccia parallela al piano di scorrimento del pannello di nodo. Tale disposizione è stata dettata dalla volontà di eliminare del tutto, nelle letture, gli effetti flessionali prodotti sulla superficie della barra dalle curvature locali, permettendo quindi di quantificare gli effetti locali indotti sulla barra dalla deformazione trasversale a taglio.



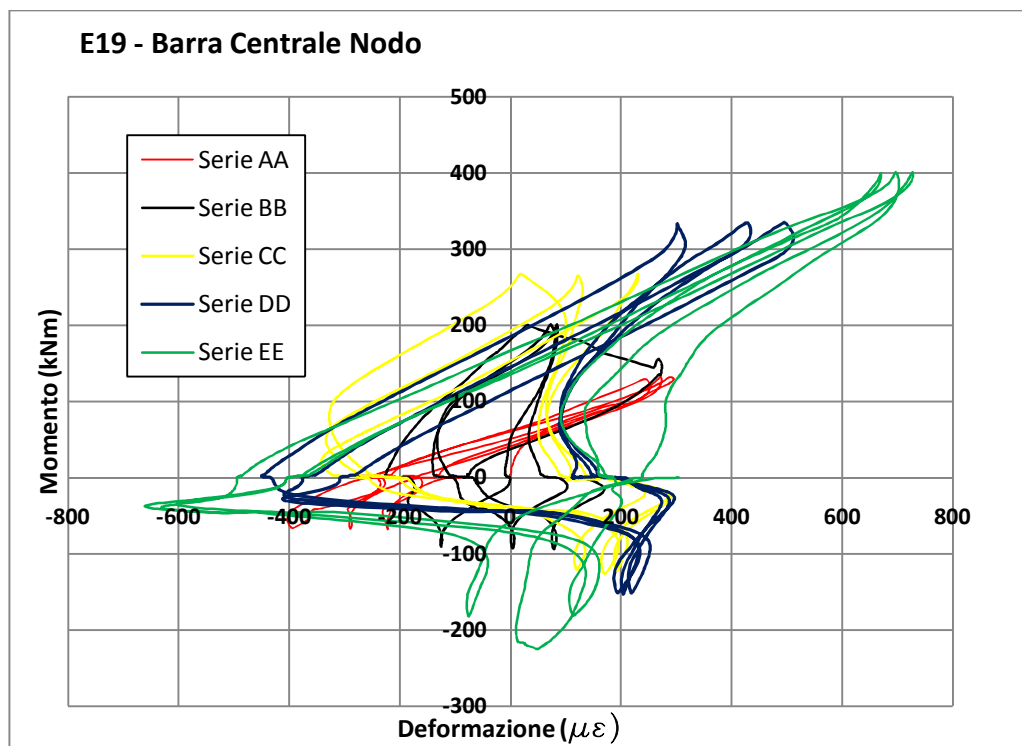
- **Figura 9.33** - Schema statico delle barre longitudinali di nodo e rappresentazione delle sollecitazioni ad esse applicate nel caso di carico positivo.

Le letture effettuate dall'estensimetro E18 in funzione del momento flettente generato dal carico sono riportate nel grafico di figura 9.34, tali letture fanno riferimento esclusivamente alle prime cinque serie di carico (AA-EE) poiché successivamente si è verificato un malfunzionamento dello strumento che ha alterato i risultati.



- **Figura 9.34** – Grafico della deformazione rilevata dall'estensimetro E18 in funzione del momento flettente applicato al pannello di nodo.

Risulta immediato osservare come, già in corrispondenza del primo ramo di scarico della *serie AA*, l'estensimetro rilevi degli accorciamenti a carico nullo sulla superficie della barra; tale fenomeno si ripete regolarmente per tutti i cicli successivi, incrementando di volta in volta la deformazione impressa a carico nullo. Lo stesso fenomeno si può osservare inoltre nel grafico di figura 9.35 che rappresenta le letture rilevate dall'estensimetro E19 posto tra la prima e la seconda staffa, a 6cm di distanza dalla piastra superiore di interruzione del getto; in tale grafico si nota inoltre che il valore delle compressioni misurate dall'estensimetro E19 sia maggiore, anche se di poco a quelle misurate dall'E18. Il valore delle tensioni di trazione misurate nei vari cicli di carico, per carichi positivi, risulta pressoché uguale.

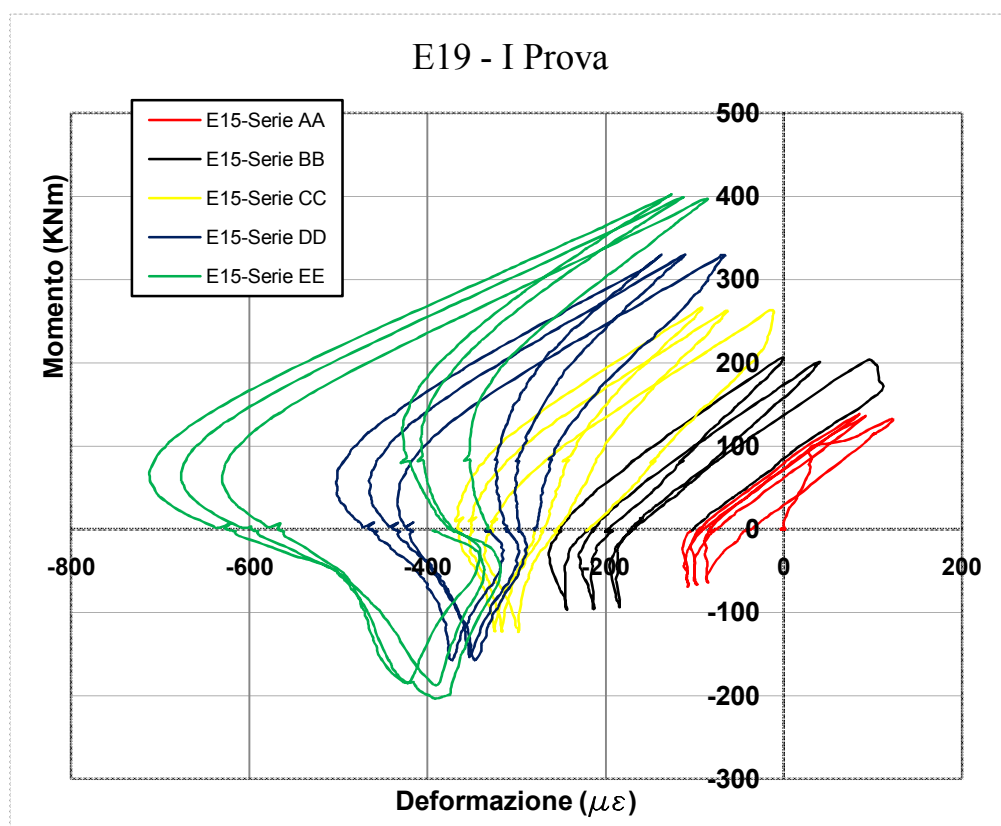


- **Figura 9.35-** Grafico della deformazione rilevata dall'estensimetro E19 in funzione del momento flettente applicato al pannello di nodo.

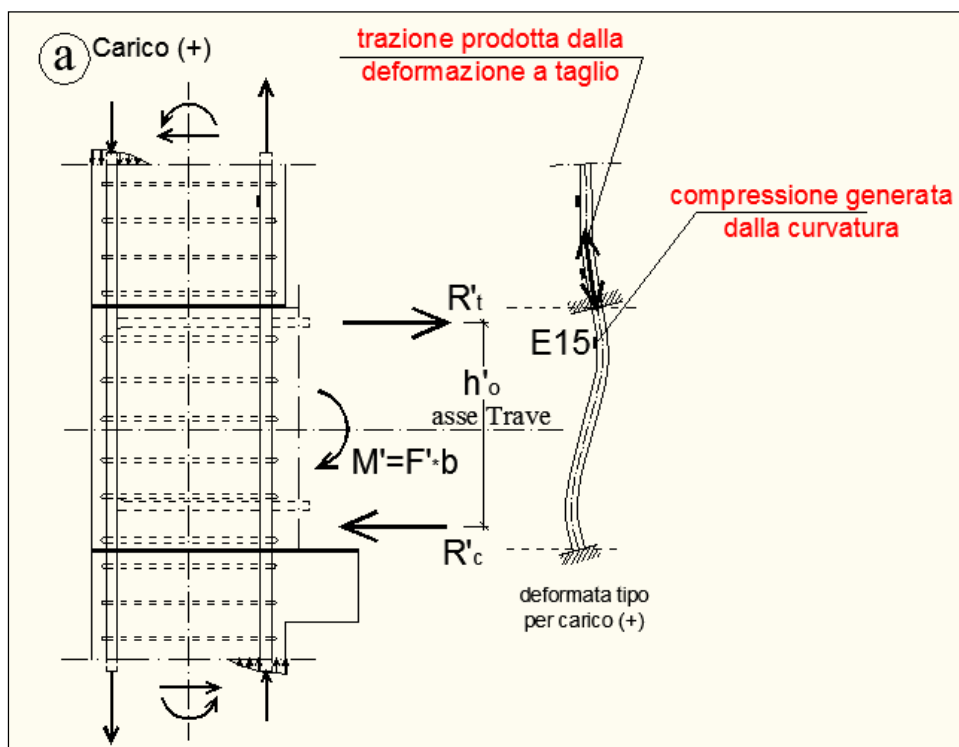
Le possibili cause delle deformazioni impresse a carico nullo, poste in evidenza dalle rilevazioni effettuate, possono essere molteplici data la complessità dello stato tensionale nella zona considerata; molto probabilmente si può pensare ad una deformazione trasversale a taglio della barra, indotta dallo scorrimento superiore orizzontale del pannello di nodo ed impressa, anche a carico nullo, dalle deformazioni degli elementi di nodo circostanti (fessurazioni diagonali del pannello di nodo non completamente richiuse, scorrimenti più o meno accentuati del tratto di barre integrative ancorate nel nodo, ecc.) inoltre si può considerare l'eventuale effetto del confinamento del calcestruzzo all'interfaccia d'aderenza con la barra longitudinale d'armatura.

Come sottolineato in precedenza la disposizione degli estensimetri sulla faccia parallela al piano di scorrimento del pannello di nodo ci consente di affermare che la deformazione rilevata sia dovuta quasi completamente all'effetto dello scorrimento a taglio del pannello stesso. Per confermare questa ipotesi si fornisce nel grafico di figura 9.36 la lettura effettuata durante la prova precedente dall'estensimetro posto in una posizione simile (2cm più in alto) a quella occupata dall'estensimetro E19 nella prova corrente. Tale estensimetro era stato però incollato nella parte interna della barra, non consentendo di dividere il contributo flessionale da quello tagliante.

Si osserva innanzitutto un andamento simile a quello dell'estensimetro E19 evidenziando delle deformazioni negative a carico nullo; i valori di deformazione negativa rilevati nelle due prove sono inoltre confrontabili. Per valori di carico positivi invece si vede come i valori rilevati siano sempre negativi e molto vicini allo zero; si può ipotizzare che i valori di trazione dati dalla deformazione a taglio siano bilanciata dalla compressione data dalla curvatura della barra come si vede nella schematizzazione di figura 9.37.



- **Figura 9.36** - Grafico della deformazione rilevata dall'estensimetro posto nella stessa posizione di E19 nella I prova in funzione del momento flettente.



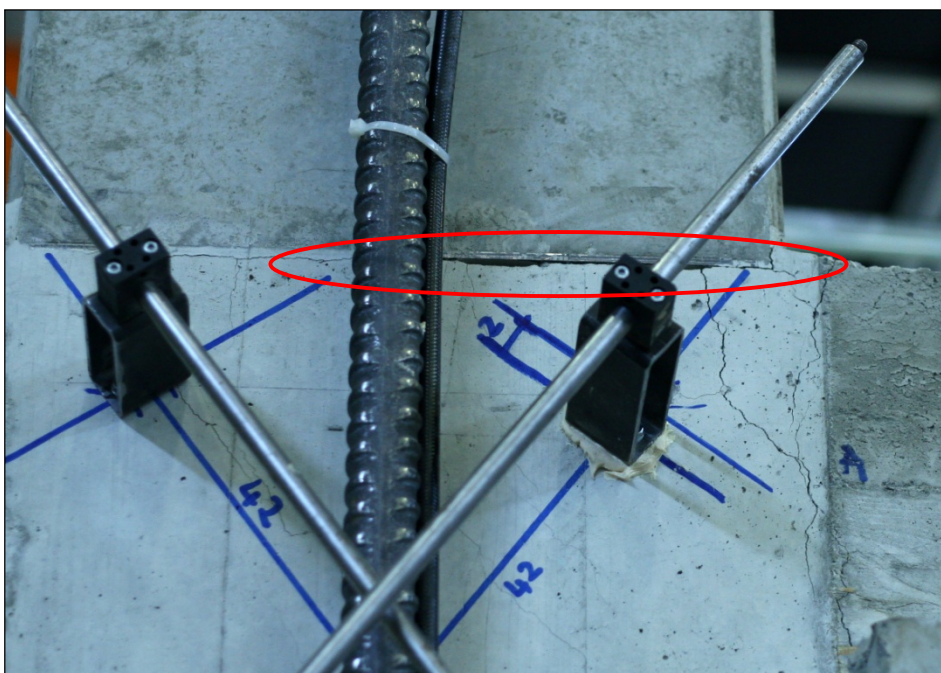
- **Figura 9.37** – Schematizzazione della deformazione delle barre longitudinali di nodo per carichi applicati positivi.

Purtroppo anche per l'estensimetro E19 si sono verificati dei malfunzionamenti per cui non si possono ritenere affidabili le letture effettuate nelle ultime serie di carico (FF-HH).

### 9.4.3 – Interfaccia nodo-pilastro

L'interfaccia tra nodo e pilastro, sia superiore che inferiore, risulta essere una zona di discontinuità tra il conglomerato utilizzato nella prefabbricazione del pilastro ed il calcestruzzo gettato in opera per la realizzazione del collegamento; tale discontinuità è resa ancora più netta dall'interposizione delle piastre, da 5 mm di spessore, utilizzate in fase di prefabbricazione del pilastro come contenimento del getto. Ne consegue che, sin dai primi livelli di carico, è risultato possibile rilevare ad occhio nudo (vedi figura 9.38) la fessurazione del perimetro della sezione di collegamento del pilastro superiore al nodo d'estremità (indicata con il numero **2** nello schema di fig. 9.22) .





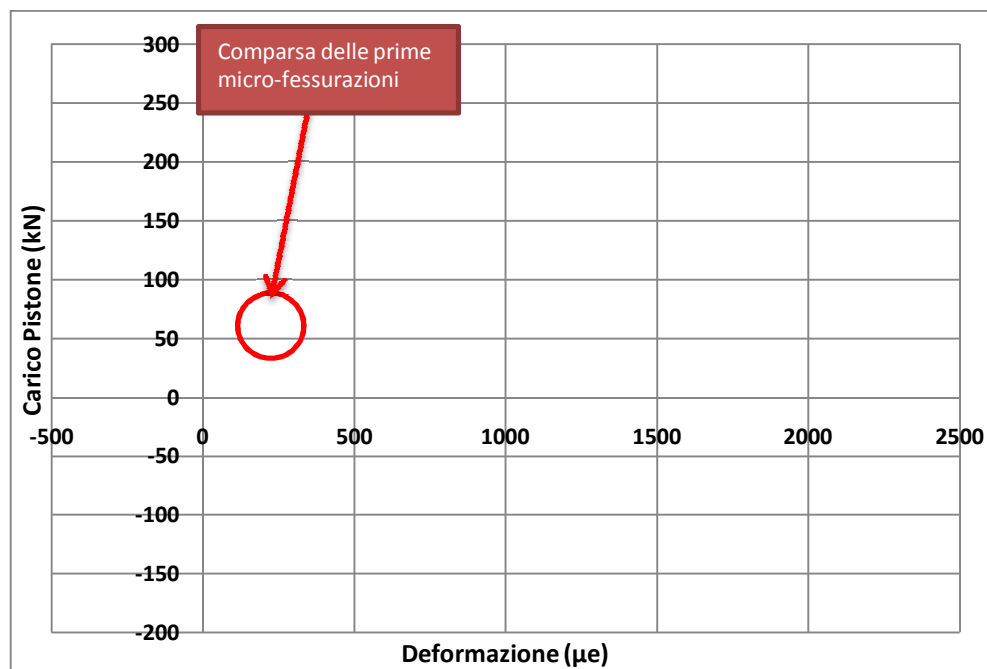
- Figura 9.38 – Fessura nell'interfaccia nodo-pilastro.

Per comprendere nel dettaglio cosa sia accaduto negli elementi di collegamento che attraversano tale interfaccia, alla luce delle riflessioni effettuate in relazione al comportamento dei tratti di barre longitudinali inclusi nel nodo, non resta che analizzare le rilevazioni effettuate dalle due coppie di estensimetri applicati alle barre longitudinali del pilastro (E5, E6).

I due estensimetri E5 ed E6 sono applicati sulla medesima barra già strumentata, nel tratto di nodo, con E18 ed E19. L'estensimetro E6 è incollato sulla faccia interna della barra, a circa 7 cm al di sopra della piastra superiore di nodo, mentre E5 è applicato a 21 cm al di sopra di tale piastra, sempre rivolto verso l'interno del getto.

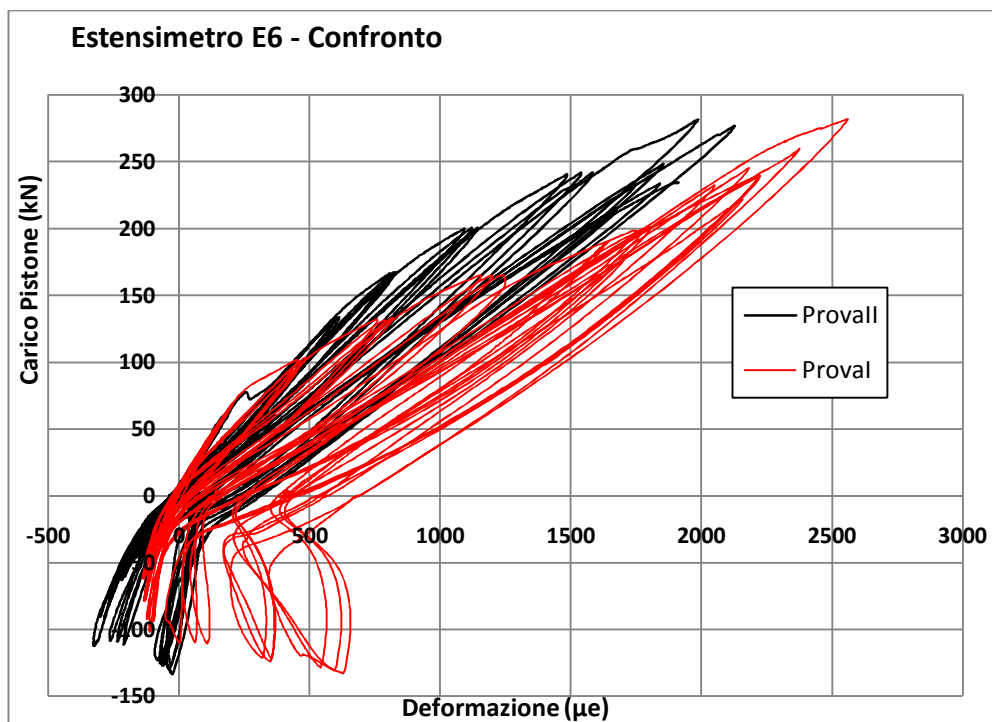
L'analisi delle rilevazioni effettuate dall'estensimetro E6, rappresentate nel diagramma di figura 9.39, evidenzia come, nell'arco in generale la deformazione sia condizionata dalle sollecitazioni flessionali presenti nella sezione prossima al nodo di collegamento (vedi schema di fig. 9.33). Si nota come al crescere del livello positivo di carico vi siano, in corrispondenza dei primi cicli di ogni serie, delle diminuzioni di pendenza delle curve rilevate; tale aspetto è sintomo del trasferimento di carico, da parte del calcestruzzo circostante, alla barra d'armatura, causato probabilmente dalle micro fessurazioni del calcestruzzo generatesi nell'interfaccia di aderenza all'acciaio. Osservando le curve di deformazione in compressione si notano viceversa accorciamenti massimi ridotti ed elevate pendenze; aspetti in parte dovuti al livello contenuto dei carichi negativi,

determinato in base alla solita proporzione che sussiste con i valori positivi, ed in parte frutto del notevole contributo resistente fornito dal calcestruzzo compresso.



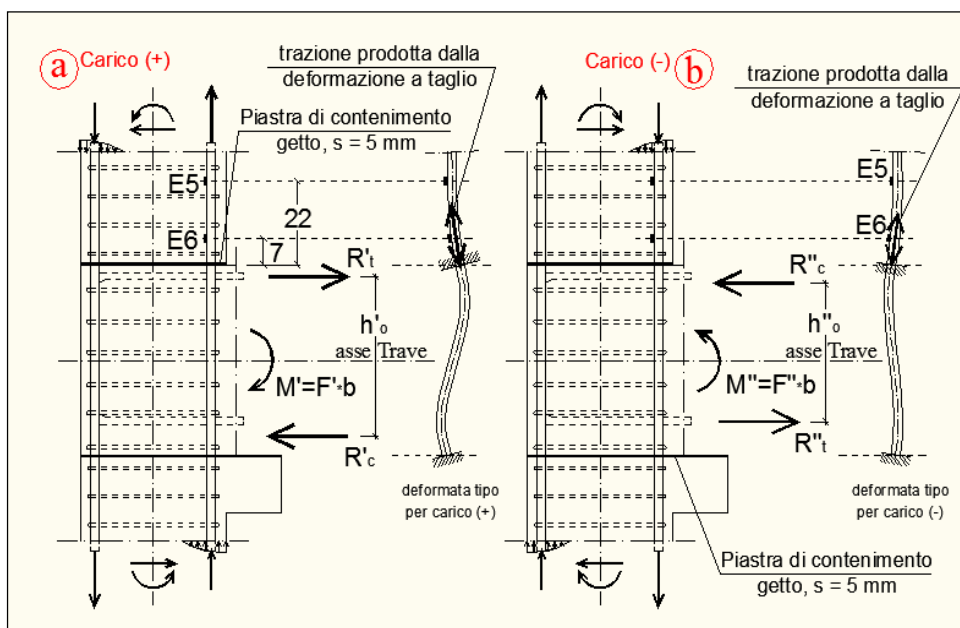
- **Figura 9.39** - Grafico della deformazione rilevata dall'estensimetro E6 in funzione del carico di prova.

In figura 9.40 è rappresentato il confronto tra l'estensimetro E6 e l'estensimetro che era posto nella medesima posizione nel corso della prima prova; l'andamento risulta in generale paragonabile per azioni di carico positive, l'unica leggera differenza riguarda l'abbattimento delle curve dovuto alle microfessurazioni, che risulti leggermente minore nel corso della seconda prova. Per carichi negativi si nota come, nel corso delle ultime tre serie di carico della prima prova, si era registrato l'inversione di segno delle deformazioni e delle deformazioni residue di trazione a carico nullo; questo fenomeno è praticamente irrilevante nel corso della prova in esame e denota, probabilmente una minore influenza degli effetti della deformazione a taglio impressa dagli scorrimenti del pannello di collegamento (vedi schemi di figura 9.41).



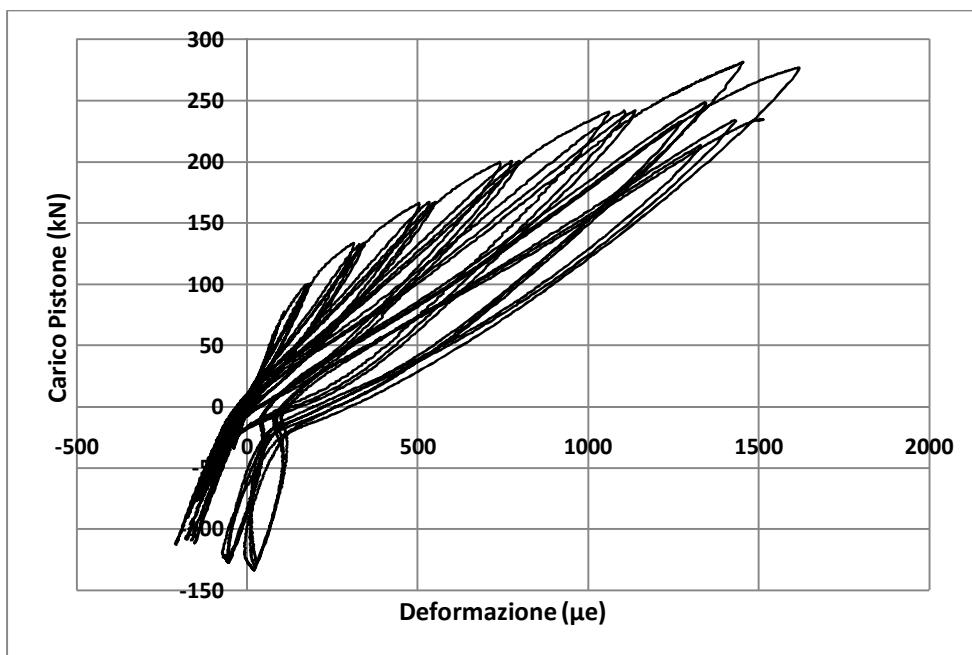
- Figura 9.40 - Confronto della deformazione rilevata dall'estensimetro E6 nelle due prove in funzione del carico di prova.

Negli schemi rappresentati in figura 10.37 si evidenzia come, per i livelli di carico di una certa rilevanza, il tratto iniziale della barra del pilastro subisca il propagarsi degli incrementi di trazione assiale prodotti, nel tratto di nodo sottostante, dagli scorrimenti a taglio del pannello di nodo. Si nota pertanto, dallo *schema a* di fig. 9.41, che per carichi di prova positivi l'allungamento indotto dalla deformazione a taglio va ad amplificare la deformazione prodotta dalla trazione di natura flessionale; le rilevazioni effettuate dall'E6 evidenziano infatti picchi deformativi pari a circa  $2.200 \mu\epsilon$ , molto vicini al limite di snervamento pari a circa  $2.500 \mu\epsilon$ . Occorre inoltre osservare che, durante le fasi di scarico delle azioni positive applicate nelle ultime quattro serie, la trazione assiale aggiuntiva, così come la deformazione a taglio che l'ha generata, viene recuperata più lentamente, producendo degli allungamenti residui a carico nullo (vedi grafico di fig. 9.40). Dallo *schema b* di fig. 9.41 si nota invece che, applicando carichi di prova negativi, l'allungamento indotto dalla deformazione a taglio va a contrastare la deformazione prodotta dalla compressione di natura flessionale ed a recuperare parte della trazione residua.



- **Figura 9.41** - Schematizzazioni delle deformate delle barre longitudinali del pilastro.

Il comportamento del tratto superiore delle barre longitudinali del pilastro disposte sul lato parallelo alla trave può essere descritto avvalendosi delle rilevazioni effettuate dall'estensimetro E5, posto come detto a 22 cm dalla piastra superiore di nodo. L'andamento di tali rilevazioni in funzione del carico di prova, rappresentato graficamente in figura 9.42, evidenzia, in corrispondenza dei primi cicli di caricamento positivo di ogni serie delle diminuzioni di pendenza simili, anche se lievemente minori, a quelle evidenziate dall'E6; si può quindi affermare che le micro fessurazioni del calcestruzzo all'interfaccia di aderenza con l'acciaio si protraggono almeno per i primi 22 cm del pilastro, inducendo trasferimenti di tensione alle barre d'armatura tese. Avvenuto l'assestamento di tali scorrimenti d'aderenza, localizzati nell'ultimo tratto del ramo di carico del primo ciclo di ogni serie, il successivo comportamento ciclico delle deformazioni risulta lineare e fedele alla distribuzione delle sollecitazioni flessionali previste per i vari livelli di carico, sia di segno positivo che negativo (vedi *schemi a e b* di fig. 9.41).



- **Figura 9.42** - Grafico della deformazione rilevata dall'estensimetro E5 in funzione del carico di prova.

#### 9.4.4 – Interfaccia Nodo-Trave

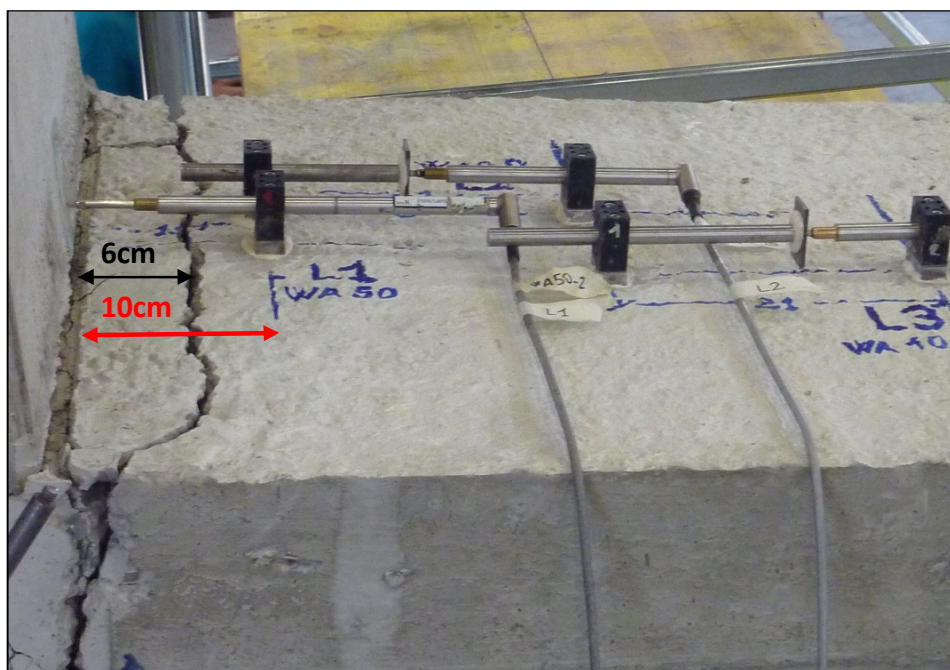
Il tratto iniziale della trave, prossimo alla sezione di innesto nel nodo di collegamento, risulta essere la zona nevralgica della struttura di prova poiché progettualmente designata, nel rispetto del *criterio della gerarchia delle resistenze*, come sede preferenziale di plasticizzazioni, all'atto della formazione dei meccanismi dissipativi, e quindi come localizzazione dei meccanismi di rottura.

Si comprende dunque come l'aspetto più delicato in un collegamento d'estremità, come quello in esame, riguardi l'efficacia degli ancoraggi delle barre integrative disposte nel getto di collegamento; è stato necessario pertanto monitorare il complesso di deformazioni e spostamenti, che si attuano nell'arco della prova ciclica a rottura su barre d'armatura e calcestruzzo, per comprendere se tali ancoraggi hanno consentito o meno alle barre integrative di fornire l'escursione plastica utile al raggiungimento di una efficiente dissipazione energetica ed una resistenza ultima paragonabile ai valori sperimentali di calcolo. Per tali ragioni la maggior parte di induttivi ed estensimetri utilizzati nella prova in esame sono stati disposti proprio nei primi 52 cm di trave (vedi schemi applicativi del capitolo 6 e 7).

Inoltre un aspetto fondamentale di questa II prova eseguita sul collegamento strutturale, riguardava proprio lo studio dell'efficacia degli ancoraggi a doppia piegatura

delle barre d'armatura integrative che verrà attentamente analizzata nel paragrafo 9.4.5.

Nel corso della prova ciclica in esame l'applicazione dei carichi positivi ha prodotto all'estradosso della trave due fessure trasversali che si sono propagate anche lungo le facce laterali, rappresentate con i numeri **3** e **6** nello schema di fig. 9.22. La prima di tali fessure, formatasi a filo pilastro, è risultata visibile ad occhio nudo in prossimità del massimo valore di carico positivo applicato nella *serie DD*; la seconda fessura, formatasi a circa 6 cm dal filo pilastro, è risultata visibile immediatamente più tardi, nel corso della *serie EE*. Dall'immagine di figura 9.43, scattata a fine prova, risultano visibili le propagazioni verticali delle fessure sul lato della trave.



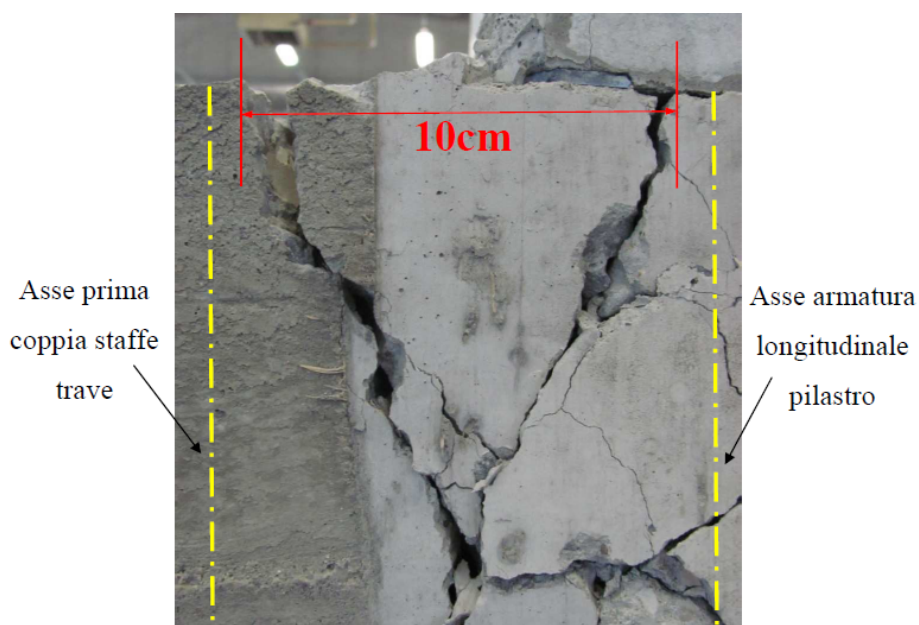
- Figura 9.43 – Fessurazione all'estradosso della trave a fine prova



La disposizione della seconda fessura, a circa 6cm dal filo pilastro, non è casuale ma avviene in prossimità della doppia staffa  $\varnothing 16$  della trave il cui asse dista circa 8 cm dal filo esterno del pilastro, come evidenziato nelle figura 9.44 e 9.45.

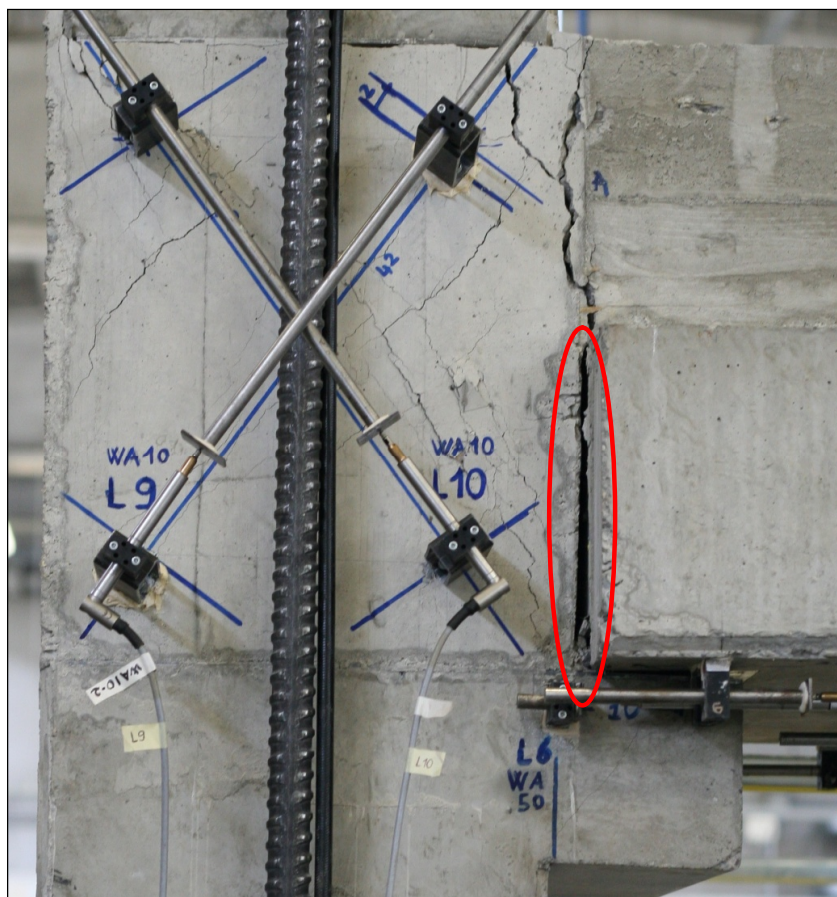


- Figura 9.44 – Disposizione delle armature della trave prima del getto di completamento.



- Figura 9.45 – Vista del cuneo di distacco formatosi all'estradosso della trave in corrispondenza dell'innesto trave-pilastro.

L'applicazione dei carichi di prova negativi ha prodotto all'intradosso della trave lo scostamento della soletta prefabbricata dal pilastro; data la presenza della mensola d'appoggio inferiore, tale scostamento risulta visivamente rilevabile esclusivamente dalle fessure verticali presenti su entrambe le facce laterali della trave, rappresentate con il numero **3** nello schema di fig. 9.22, e dai segni che lo scorrimento sulla piastra inferiore di nodo, prolungata fino all'estremità della mensola, ha prodotto sull'intradosso della trave. Le fessure verticali sono risultate visibili ad occhio nudo già in prossimità del massimo valore negativo applicato al 1° ciclo della serie GG, ma l'ampliamento più significativo è stato osservato in corrispondenza del massimo valore negativo di carico applicato al 1° ciclo della serie HH; l'immagine di figura 9.46 mostra l'ampiezza della fessura in corrispondenza del massimo carico negativo applicato nel corso del 1° ciclo delle serie HH.



- **Figura 9.46** – Fessurazione laterale dell'intradosso trave in prossimità del massimo carico negativo (1° ciclo-serie HH).

Al termine del 1° ciclo della serie HH il deciso incremento d'ampiezza della fessura d'intradosso, unitamente all'avanzato quadro fessurativo presente all'estradosso della

trave hanno in pratica determinato la formazione di una cerniera plastica in corrispondenza della sezione di collegamento della trave al pilastro, come evidenziato dalla completa fessurazione della sezione d'estremità della trave osservata durante il ramo di scarico successivo al raggiungimento del massimo carico negativo (fig. 9.47). Si intuisce come, per ampi intervalli di variazione del carico, intermedi tra il massimo valore positivo e quello negativo, il bilanciamento della sollecitazione flessionale sia totalmente affidato alle sole armature integrative, con conseguente incremento degli spostamenti registrati all'estremità della trave.



- **Figura 9.47** – Fessurazione laterale dell'intradosso trave in prossimità del valore di carico nullo (3° ciclo-serie GG).

L'incremento della fessurazione all'estradosso della trave, indotto dai successivi incrementi di carichi positivi, ha evidenziato, all'intradosso, la fessurazione delle ali laterali della trave, rappresentata con il numero **8** nello schema di fig. 9.22. Inizialmente, in corrispondenza del 3° ciclo della serie GG, si è osservata la fessurazione della parte inferiore dell'ala, quindi, in prossimità del massimo carico positivo applicato al 1° ciclo



della *serie HH*, la fessurazione si è propagata anche alla faccia laterale dell'ala, determinando nei cicli successivi l'espulsione del copriferro inferiore su entrambe le ali (vedi fig. 9.48 e 9.49).



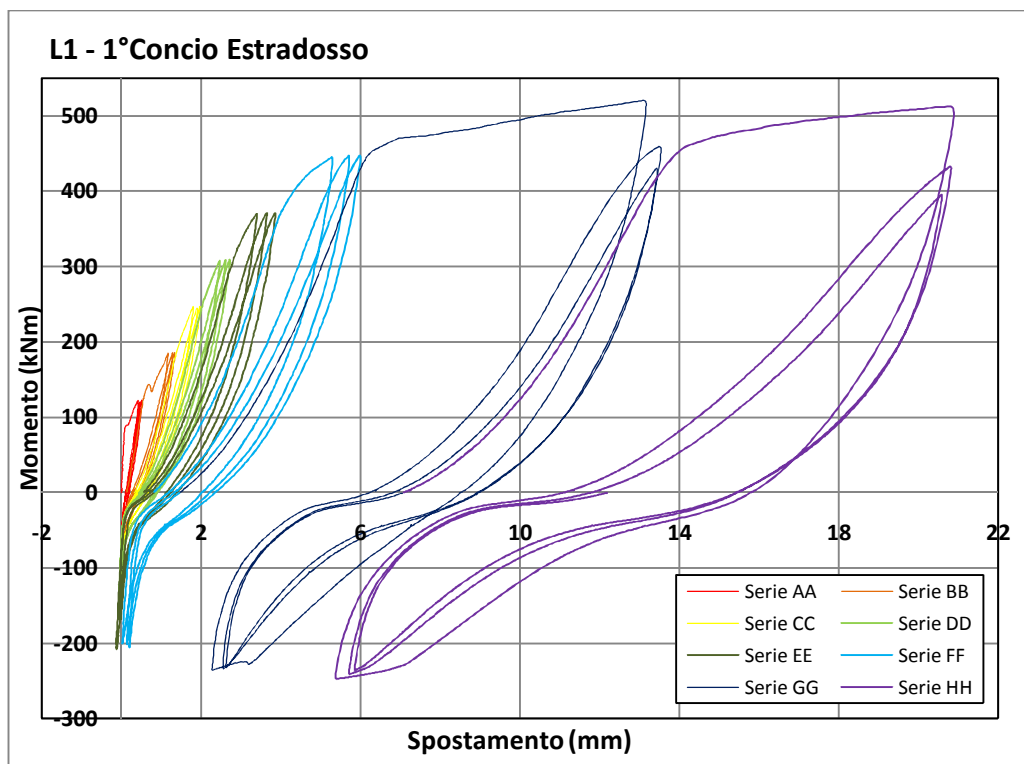
- **Figura 9.48** – Fessurazione laterale dell'intradosso trave in prossimità del massimo carico negativo (1° ciclo-serie HH).



- **Figura 9.49** – Fessurazione laterale dell'intradosso trave in prossimità del massimo carico negativo (3° ciclo-serie HH).

Al fine di comprendere nel dettaglio quali siano stati i meccanismi responsabili degli eventi macroscopici osservati si procede all'analisi ed al confronto delle rilevazioni strumentali relative alla trave ed all'interfaccia col pilastro.

Si analizzano anzitutto gli spostamenti relativi tra le sezioni estreme del primo concio di trave, di lunghezza 10cm, rilevati dall'induttivo L1, posto nella mezzeria dell'estradosso, e dalla coppia di induttivi, L4 ed L6, posti alle estremità della soletta d'intradosso, rappresentati rispettivamente nei grafici delle figure 9.50 e 9.51; in entrambi i grafici sono state trascurate le rilevazioni relative alla *serie di carico II*, al fine di consentirne una migliore rappresentazione. I grafici sono rappresentati in funzione del momento medio sul 1°concio.

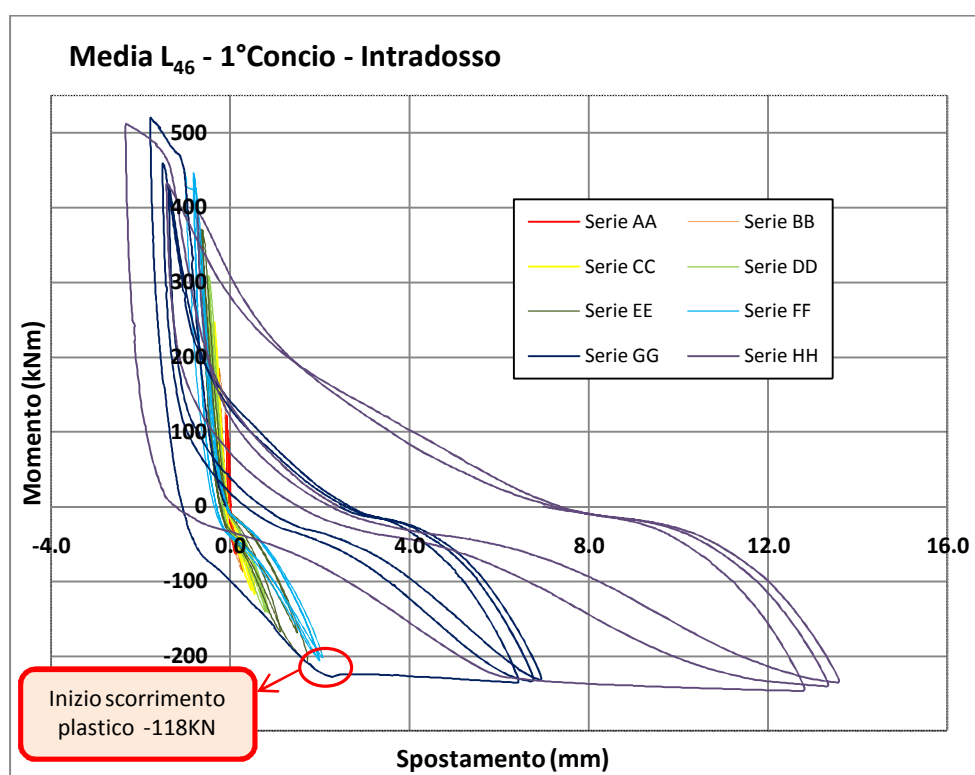


- **Figura 9.50** – Grafico degli spostamenti relativi della sommità del primo conio di trave rilevati dall’induttivo L1 in funzione del momento medio.

Risulta immediato notare che lo spostamento della sommità della trave rispetto al pilastro risulta sempre positivo, escludendo piccoli accorciamenti dell’ordine del centesimo di millimetro in corrispondenza delle massime sollecitazioni negative delle prime serie di carico; osservando l’andamento delle singole curve cicliche si nota come in realtà vengano registrati, in corrispondenza dei valori negativi di carico, degli accorciamenti relativi, vanificati però in termini assoluti dai valori di spostamento registrati in corrispondenza dei carichi nulli. Gli spostamenti residui a carico nullo risultano essere sempre crescenti, con incrementi notevoli soprattutto in corrispondenza dei massimi livelli di carico positivo applicati nel corso del *1° ciclo* delle serie *GG* e *HH*; entrambi gli scorrimenti raggiungono valori pari a *7,6 mm* e *15,7 mm* rispettivamente. Osservando le immagini di figura 10.39 e 10.42 risulta chiaro come tali spostamenti a carico nullo siano dovuti prevalentemente all’apertura delle due fessure all’estradosso della trave e che hanno determinato la formazione della una *cerniera plastica* in corrispondenza della sezione di collegamento della trave al pilastro. Il fatto che i due cicli di carico successivi ad entrambi gli spostamenti si ripetano con cali di resistenza e rigidità, particolarmente evidenti nella *serie HH*, ma senza manifestare ulteriori spostamenti a carico positivo costante, sottolineano la natura degenerativa di tali fenomeni.



Si osserva inoltre come, in corrispondenza dei carichi di segno negativo, i primi tratti dei rami di carico e di scarico, pressoché orizzontali, evidenzino l'utilizzo di minime quantità del carico di prova per richiudere e riaprire, rispettivamente, le fessure all'estradosso.



- **Figura 9.51** – Grafico della media degli spostamenti relativi all'intradosso del primo concio di trave rilevati dagli induttivi L4 ed L6 in funzione del momento medio.

Gli spostamenti relativi considerati all'intradosso vengono rappresentate nel grafico di figura 9.51 come media delle letture eseguite dai due induttivi L4 ed L6, posti sempre a battuta sul filo esterno del pilastro. Analizzandone l'andamento in funzione del momento medio si nota un comportamento più omogeneo rispetto a quanto osservato all'estradosso, con escursioni negative e positive degli spostamenti pressoché elastiche nell'arco di tutte delle prime sei serie di carico (AA-FF), e con rigidità, espresse sempre in funzione del momento flettente medio, più marcate nel caso delle rilevazioni in accorciamento (relative a carichi positivi), a causa del contributo resistivo fornito dal calcestruzzo compresso.

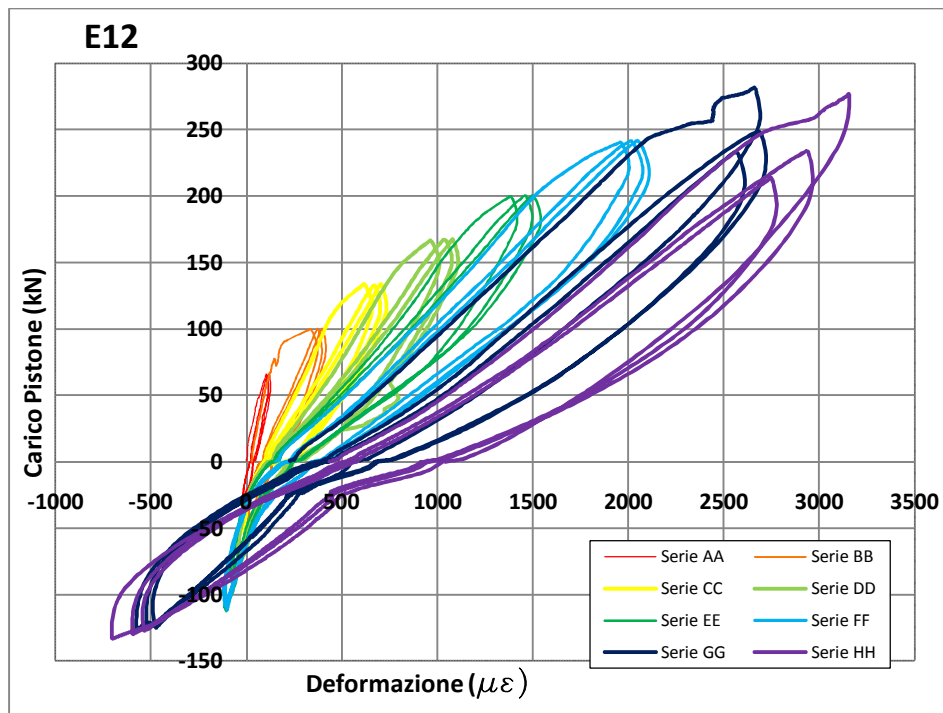
Nel corso della *serie GG* l'applicazione dei massimi carichi negativi ha indotto degli spostamenti relativi all'intradosso di circa 5,9 mm, generando la prima fessurazione visibile ad occhio nudo, rappresentata in figura 9.48; l'applicazione dei massimi carichi positivi ha causato invece l'elevata fessurazione rilevata all'estradosso da L1, che ha

prodotto un repentino abbassamento dell'asse neutro della sezione d'estremità della trave. Gli elevati livelli di compressione raggiunti nelle fibre inferiori del calcestruzzo di nodo hanno indotto uno schiacciamento tale da produrre una deformazione residua pari, in media, a circa  $1,2\text{ mm}$ , rilevabile nel grafico di figura 10.46 in corrispondenza di valori nulli del carico. Durante il  $1^{\circ}$  ciclo di carico della serie *HH* l'ulteriore aumento di carico ed il conseguente ampliamento della fessurazione d'estradosso hanno prodotto, in corrispondenza dei valori positivi di carico, l'ulteriore abbassamento dell'asse neutro d'intradosso; il nuovo incremento delle compressioni applicate a spessori sempre più ristretti di calcestruzzo ha fatto registrare, in corrispondenza di carichi nulli, un accorciamento residuo di circa  $1,6\text{ m}$ .

Allo scopo di approfondire lo studio dei fenomeni che si sono verificati all'interfaccia nodo-trave, si vanno ora ad esaminare le deformazioni rilevate dagli estensimetri posti sulle barre integrative d'armatura inserite nel getto di completamento.

Si considera in prima analisi la barra integrativa d'estradosso sulla quale sono applicati quattro estensimetri; l'estensimetro E15 posto all'interno del nodo a circa 9,5cm dagli spezzoni d'ancoraggio delle barre integrative (misura che corrisponde a 2cm dopo l'asse del pilastro), l'estensimetro E14 posto a 15cm dal filo del pilastro, l'estensimetro E13 posto a circa 36cm dal filo del pilastro e l'estensimetro E12 posto a una distanza di 57cm dal filo del pilastro. Tutti gli estensimetri sono stati applicati sul lato della barra in modo da eliminare l'effetto deformativo dovuto alla curvatura.

Nel grafico di figura 9.52 sono riportate le letture effettuate dall'estensimetro E12, il più lontano dall'estremità del pilastro.



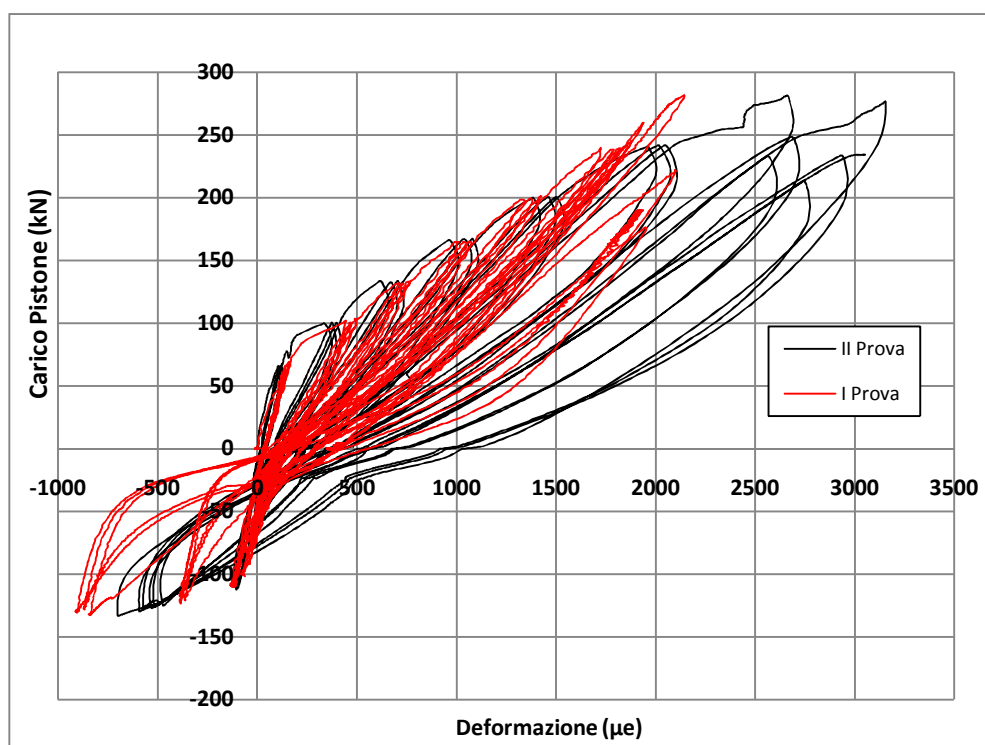
- Figura 9.52 – Grafico delle letture effettuate dall'estensimetro E12 in funzione del carico di prova.

L'estensimetro E12 mostra un andamento delle deformazioni piuttosto regolare; nelle prime sei serie di carico (AA-FF) si hanno deformazioni di trazione per carichi applicati positivi e deformazioni di compressione per carichi negativi.

Le micro fessurazioni relative alle prime cinque serie di carico generano sull'interfaccia acciaio-calcestruzzo delle deformazioni residue di trazione, rilevate a carico nullo, dell'ordine delle 250  $\mu\epsilon$ , mentre la successiva escursione plastica relativa alla serie GG raddoppia tale deformazione residua. Nella serie di carico GG si registra lo snervamento dell'acciaio poiché la deformazione raggiunge, durante il 1° ciclo della serie GG, una deformazione di 2650  $\mu\epsilon$  con conseguente plasticizzazione dell'armatura evidenziata anche da un considerevole aumento della deformazione a carico nullo che raggiunge i 500  $\mu\epsilon$  e da un allargamento isteretico delle curve. Nella serie di carico HH le deformazioni subiscono un ulteriore aumento raggiungendo la soglia dei 3000  $\mu\epsilon$  per carichi positivi applicati; per carichi di segno negativo invece la massima deformazione di compressione raggiunge i -750  $\mu\epsilon$ .

L'estensimetro E12, come già sottolineato in precedenza, risulta essere il più lontano tra quelli posizionati sulla barra integrativa superiore, nonostante ciò ha registrato deformazione di trazione che hanno prodotto lo snervamento dell'acciaio.

Nel grafico di figura 9.53 è riportato un confronto tra l'estensimetro E12 e l'estensimetro che si trovava in una posizione simile nel corso della I prova; dal confronto si nota come nel corso della I prova si siano registrate deformazioni più contenute che non raggiungevano il limite di snervamento ; inoltre i cicli risultavano più stretti, segno di una minore dissipazione di energia. Tale differenza è dovuta probabilmente alla migliore aderenza acciaio-calcestruzzo che si è avuta nella prova in esame grazie anche alla migliore prestazione degli ancoraggi di tali barre.

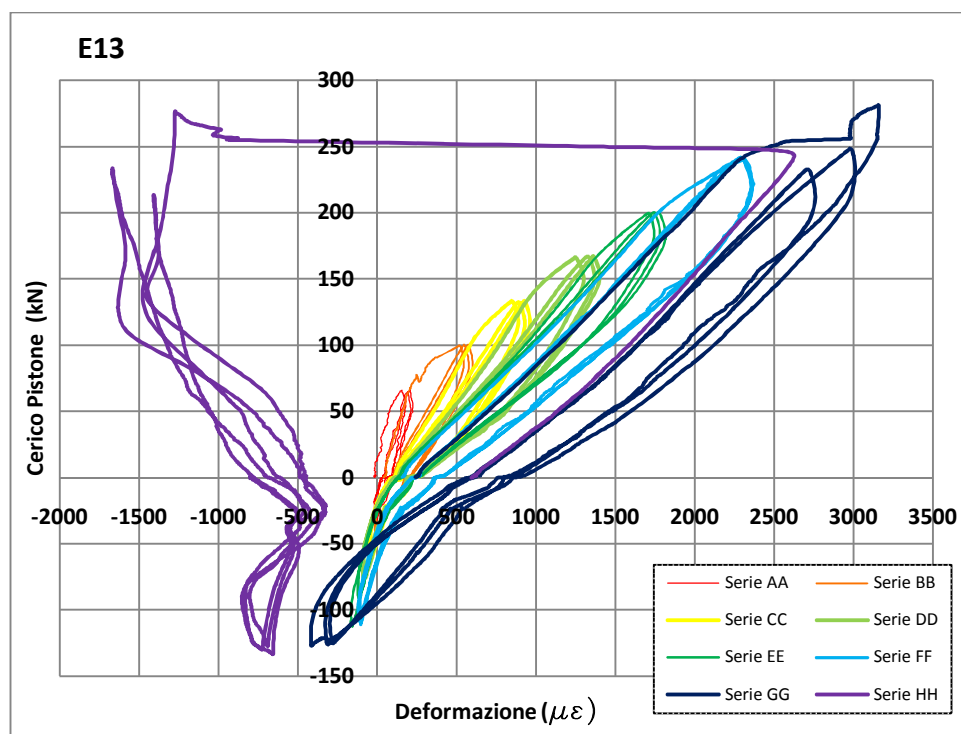


- **Figura 9.53** – Confronto tra le letture effettuate dall'estensimetro E12 nelle due prove in funzione del carico di prova.

Nel grafico di figura 9.54 sono riportate le letture effettuate dall'estensimetro E13, posizionato a 36cm dal filo del pilastro.

Dal grafico si nota come, per azioni di carico positive, si ha un progressivo aumento della deformazione con abbattimento della pendenza delle curve nelle varie serie a causa delle microfessurazioni che avvengono nell'area di contatto tra la barra e il calcestruzzo. Nelle prime sei serie di carico (AA-FF) si arriva ai limiti dello snervamento ( $2400\mu\epsilon$ ). Dal 1° ciclo della serie GG, raggiunto lo snervamento, si nota un sostanziale allargamento isterico delle curve. Nel 1° ciclo della serie HH, alla fine dall'applicazione del carico

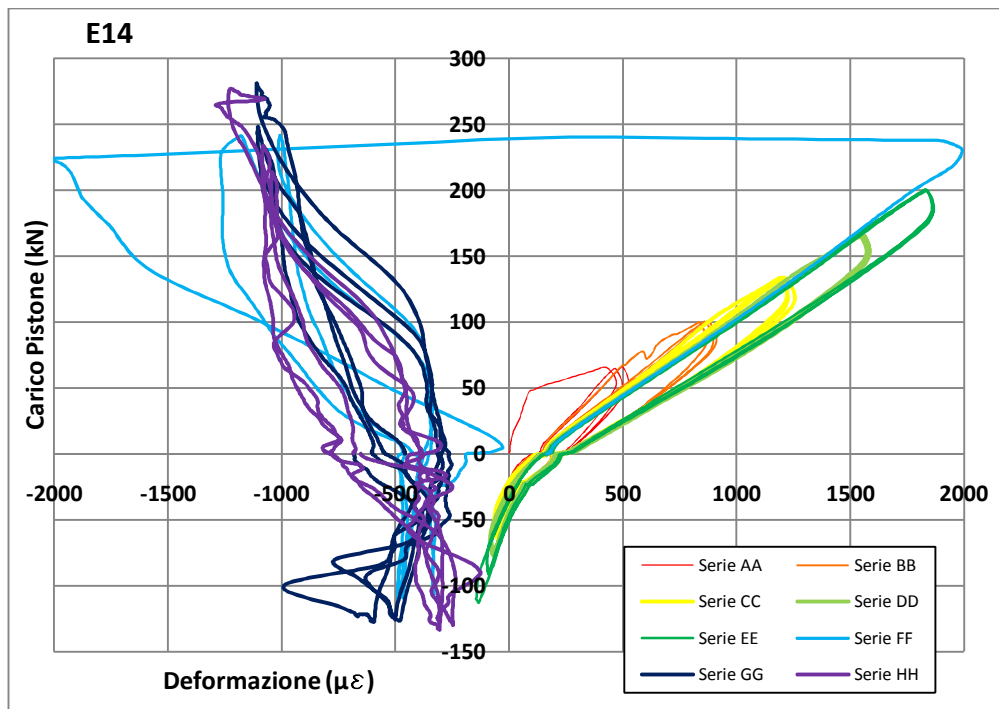
positivo si è registrata un'istantanea inversione del segno della deformazione; tale fenomeno, registrato anche dall'estensimetro E14 (vedi figura 9.55) potrebbe essere causato da un'improvvisa rotazione della barra con conseguente aumento del contributo dato dalla curvatura.



- **Figura 9.54** – Grafico delle letture effettuate dall'estensimetro E13 in funzione del carico di prova.

Nel grafico di figura 9.55 sono riportate le letture effettuate dall'estensimetro E14, posizionato a 15cm dal filo del pilastro.

L'andamento del grafico mostra come per azioni di carico positive si hanno, ovviamente, deformazioni di trazione. Nelle prime sei serie di carico (AA-FF) si costantemente un aumento di deformazione senza un particolare decadimento della pendenza delle curve. Durante la serie di carico FF si nota come il livello delle deformazioni sia ancora entro i limiti di snervamento. In compressione invece non si sono rilevate deformazioni degne di nota. Nel primo ciclo della serie di carico FF, terminato il processo di carico, si è registrata l'inversione del segno delle deformazioni, come accaduto per E13; tale inversione si è verificata quando la deformazione della barra non superava i 2000me.

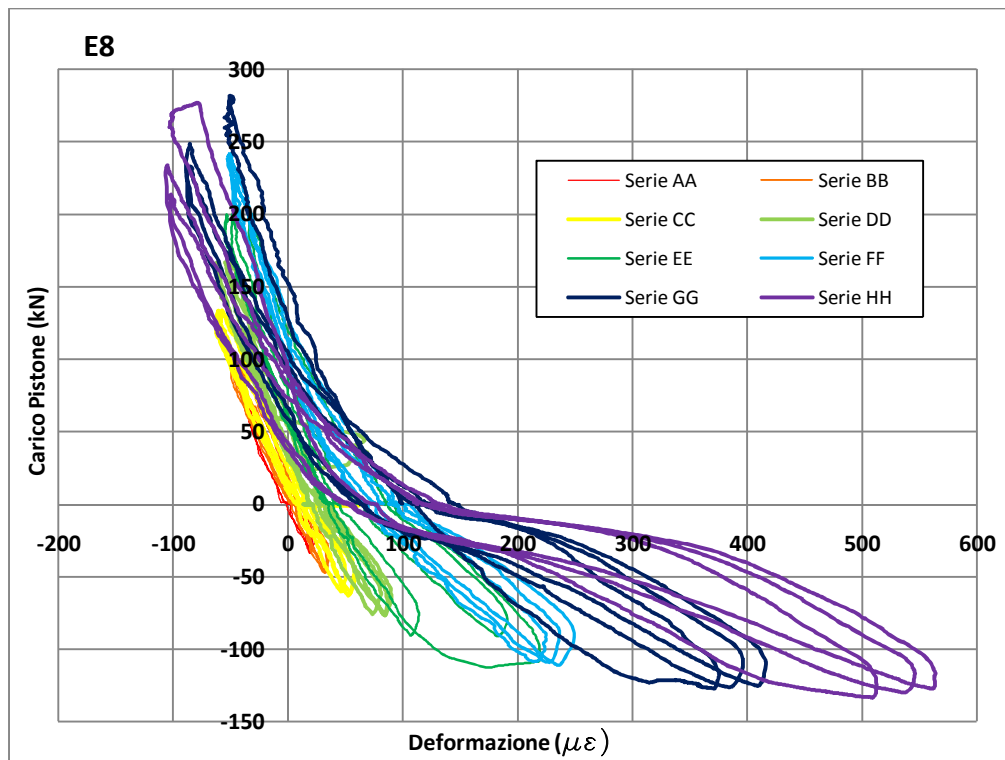


- Figura 9.55 – Grafico delle letture effettuate dall'estensimetro E14 in funzione del carico di prova.

Si passa ora ad esaminare gli estensimetri posizionati sulla barra integrativa inferiore nel getto di completamento. Tale barra risulta posizionata a 9cm dal bordo inferiore della trave, molto più in alto rispetto alle barre annegate nel getto prefabbricato .

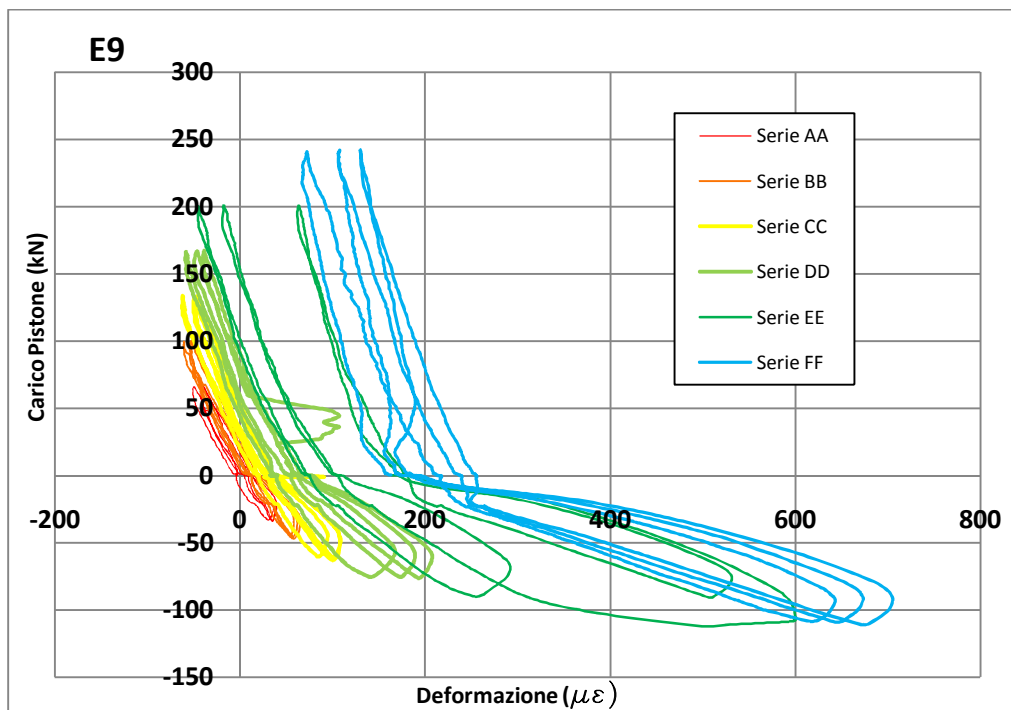
In figura 9.56 è riportato il grafico dell'estensimetro E8, posizionato a 55cm dal filo del pilastro. Si nota come i valori della deformazione siano molto contenuti. Per tutte le serie di carico si sono registrate deformazioni di compressione per carichi applicati positivi e di trazione per carichi applicati negativi. Si nota la differenza di pendenza delle curve che risultano molto più ripide per carichi positivi, a causa del aiuto fornito del calcestruzzo compresso. Si nota inoltre come le micro fessurazioni nell'interfaccia acciaio-calcestruzzo abbiano causato piccole deformazioni residue a carico nullo, dell'ordine dei  $100\mu\epsilon$ .





- Figura 9.56 – Grafico delle letture effettuate dall'estensimetro E8 in funzione del carico di prova.

Passiamo ora ad analizzare il grafico dell'estensimetro E9, posizionato a 36cm dal filo del pilastro e rappresentato in figura 9.57 e 9.58.

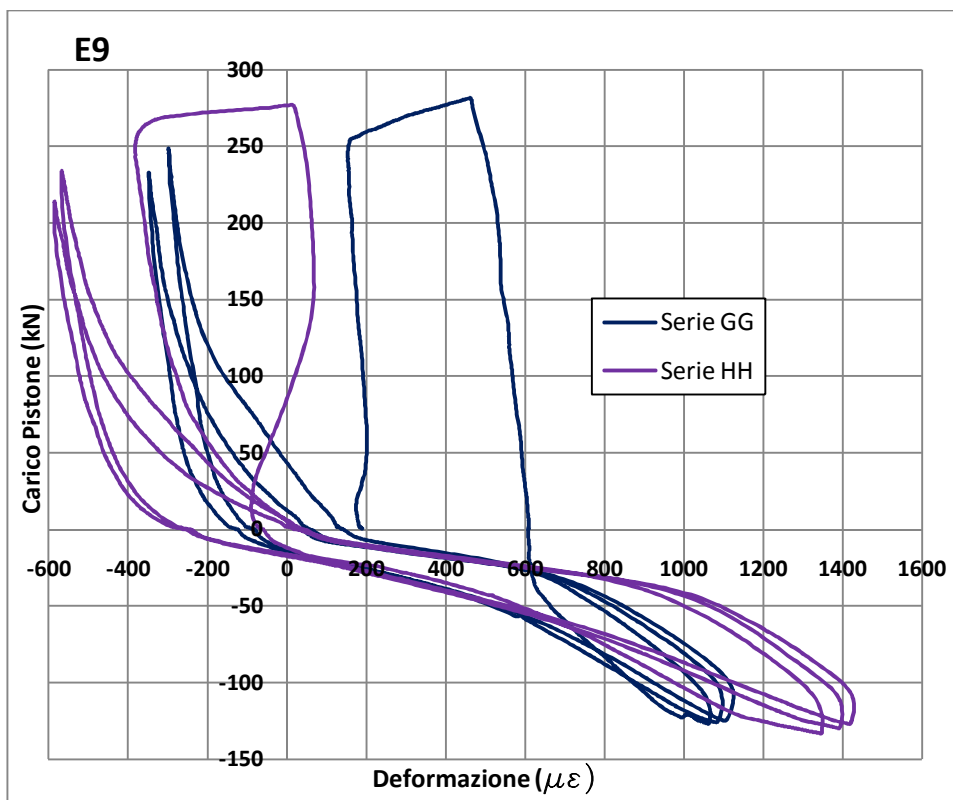


- Figura 9.57 – Grafico delle letture effettuate dall'estensimetro E9 in funzione del carico di prova (serie AA-FF).

Nelle prime cinque serie di carico (*AA-EE*) si osserva un comportamento regolare con deformazioni limitate; per carichi negativi la pendenza delle curve diminuisce all'aumentare del carico a causa delle micro fessurazioni all'interfaccia acciaio-calcestruzzo; per tutte le serie di carico si nota come in corrispondenza del massimo carico negativo le curve subiscono un leggero aumento di pendenza, frutto probabilmente del contributo fornito dal calcestruzzo compresso d'estradosso a seguito della parziale richiusura delle fessure. Le deformazioni massime per carichi negativi raggiungono  $1400\mu\epsilon$  a sottolineare come tale porzione di armatura risulti ancora in campo elastico.

Per carichi di segno positivo si nota come nel corso del *3° ciclo della serie di carico EE* si ha l'inversione del segno delle deformazioni, da contrazioni ad allungamenti, conseguenza probabile delle elevate deformazioni presenti all'estradosso che inducono infatti, nel corso dei cicli di carico, l'abbassamento dell'asse neutro.

Nel corso del *1° ciclo della serie di carico GG* si nota un grande aumento di deformazione, frutto probabilmente di un ulteriore abbassamento dell'asse neutro causato dall'allargamento delle fessure presenti all'estradosso; nel successivo ciclo si nota infatti che per carichi positivi le curve delle deformazioni ritornano negative e sono caratterizzate da tratti quasi verticali in corrispondenza dei valori massimi positivi; tale fenomeno detto "*pinching*" è causato dalla richiusura delle fessure che comporta la conseguente attivazione del calcestruzzo in compressione con un deciso incremento di rigidità. Nel corso della serie di carico *HH* si nota un comportamento del tutto simile a quanto osservato per la *serie GG*.



- **Figura 9.58** – Grafico delle letture effettuate dall'estensimetro E9 in funzione del carico di prova (serie GG-HH).

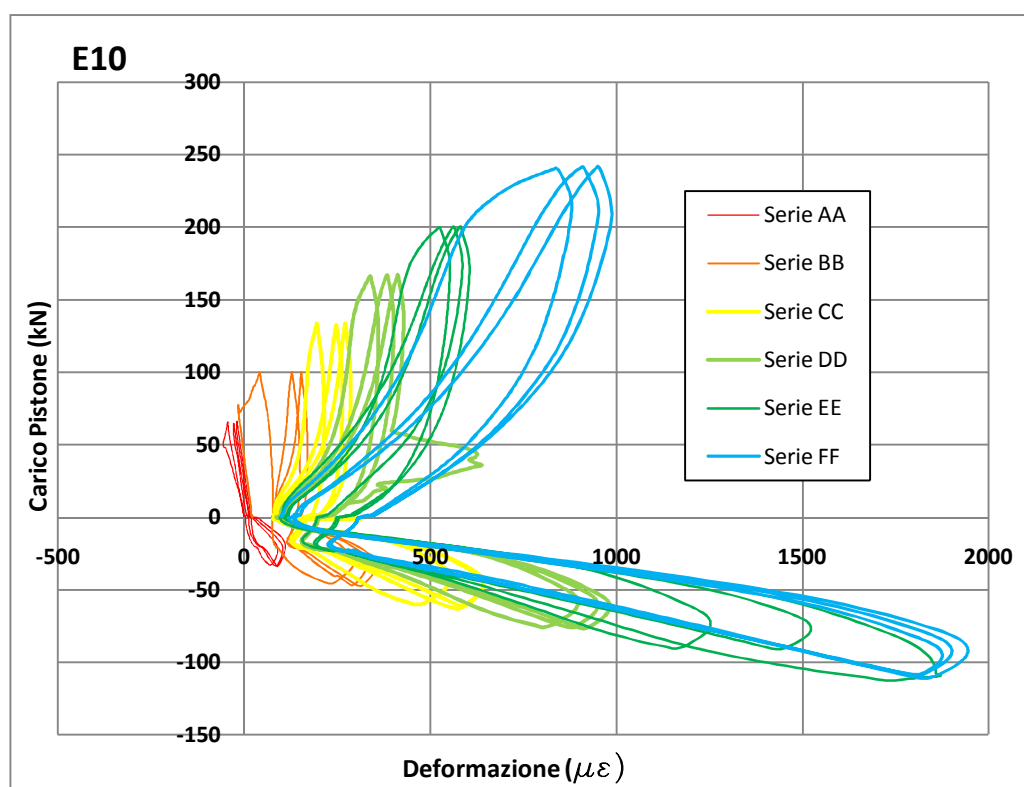
Si passa ora ad analizzare le deformazioni rilevate dall'estensimetro E10, posizionato a 15cm dal filo del pilastro, le cui letture sono rappresentate in figura 9.59 e 9.60.

L'applicazione delle prime sei serie di carico evidenzia, in corrispondenza dei primi cicli di carico negativo di ogni serie, il consueto effetto delle micro fessurazioni del calcestruzzo all'interfaccia di aderenza con l'acciaio; si nota inoltre il leggero incremento di pendenza che le varie curve subiscono in prossimità del massimo carico negativo, frutto del contributo fornito dal calcestruzzo compresso d'estradosso a seguito della parziale richiusura delle fessure.

In corrispondenza dei carichi di segno positivo si nota invece la transizione, nel passaggio dalla prima alla seconda serie di carico, da deformazioni di contrazione ad allungamenti, conseguenza delle elevate deformazioni presenti all'estradosso; tali deformazioni inducono infatti, nel corso dei cicli di carico, l'abbassamento dell'asse neutro, che si assesta, in corrispondenza degli ultimi cicli di carico, a circa 3,5 cm dall'intradosso della trave.

L'elevata quota di posizionamento delle barre integrative inferiori, disposte direttamente sulla soletta prefabbricata della trave a 9 cm dall'intradosso, fa sì che le sollecitazioni siano sempre di trazione anche in corrispondenza di carichi di prova di segno positivo.

Nel corso delle serie *CC*, *DD* ed *EE* l'andamento delle deformazioni delle barre inferiori sotto l'azione dei carichi positivi risulta pertanto proporzionale a quello delle barre superiori. L'incremento di deformazione relativo al 1° ciclo della serie *EE* denota l'ulteriore abbassamento dell'asse neutro conseguente alla fessurazione dell'estradosso, mentre l'ancora più evidente incremento relativo al 1° ciclo della serie *FF* corrisponde all'avvenuta plasticizzazione del tratto di barra superiore coinvolto nella doppia fessura di estradosso.



- Figura 9.59 – Grafico delle letture effettuate dall'estensimetro E10 in funzione del carico di prova (serie AA-FF).

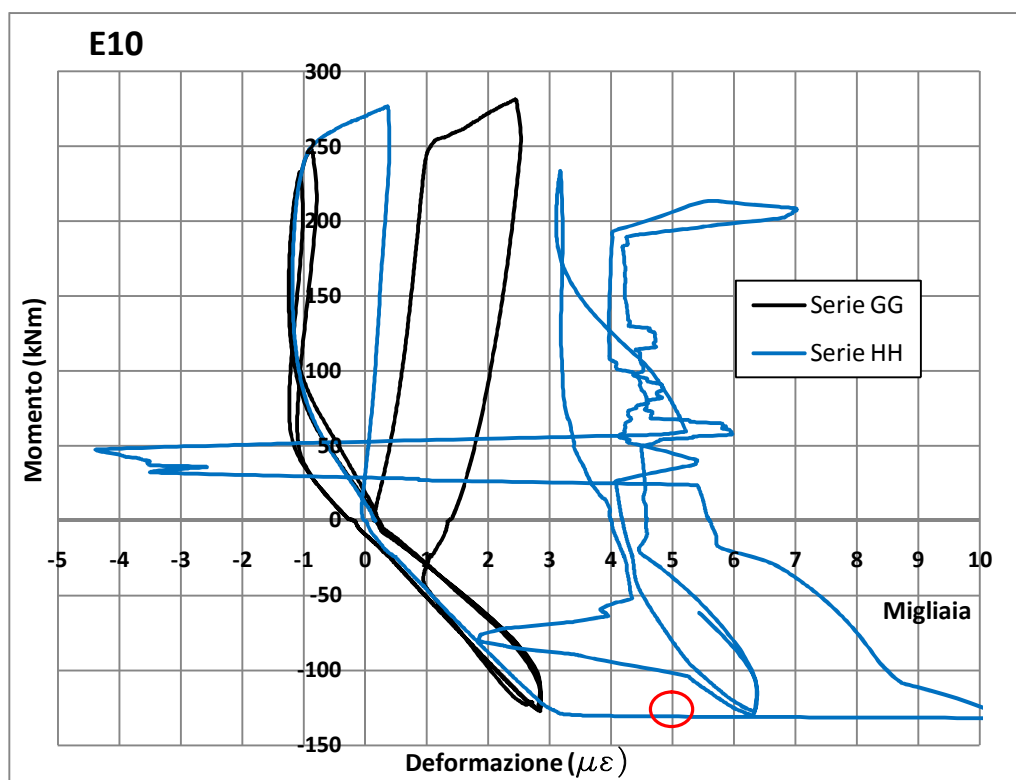
Le deformazioni assiali indotte nelle barre integrative d'intradosso dall'applicazione delle ultime tre serie di carico sono rappresentate nel grafico di figura 9.60. L'applicazione dei carichi di prova aventi segno negativo induce al 1° ciclo della serie *GG* il superamento della deformazione limite di snervamento, con conseguente variazione di pendenza della curva di carico. L'incremento di carico negativo applicato al 1° ciclo

della *serie HH* genera un andamento delle deformazioni rilevate che ripercorre fedelmente quello delle curve di carico dei cicli precedenti, quindi, eguagliati i livelli di carico limite raggiunti dalla precedente *serie GG*, le deformazioni subiscono un momentaneo incremento a cui segue un intervallo di carico a deformazione nulla; tale sequenza di avvenimenti testimonia, come già osservato per le armature superiori, la ripresa dello snervamento dal medesimo livello deformativo a cui si era interrotto all'apice del 1° ciclo della *serie GG*, e la successiva completa plasticizzazione della sezione.

L'ulteriore incremento del valore negativo del carico induce una repentina deformazione plastica di  $7.130 \mu\epsilon$  (da  $3.000 \mu\epsilon$  a  $10.130 \mu\epsilon$ ) a  $125 \text{ KN}$  di carico.

Confrontando la media delle rilevazioni eseguite dagli induttivi L4 ed L6 con le letture effettuate dall'estensimetro E10 risulta possibile, individuare indicativamente il tratto in cui è avvenuta la prima plasticizzazione delle barre d'intradosso. A tale scopo si è evidenziato, nel grafico rappresentativo i valori medi delle letture effettuate in L4 ed L6 (fig. 9.51), il punto di inizio dello scorrimento plastico relativo al 1° ciclo della *serie HH*, indicandone il corrispettivo valore di carico, e si è quindi evidenziato il corrispondente punto anche sul grafico rappresentativo le letture effettuate in E10 (fig. 9.60); si può notare come, vi sia una piccola differenza di carico l'inizio dello scorrimento plastico rilevato all'intradosso (per un carico di prova di  $-118 \text{ KN}$ ), e l'inizio del tratto plastico rilevato dall'estensimetro E10, corrispondente ad un livello di carico pari a  $-125 \text{ KN}$ . La differenza di carico sottolinea come la totale plasticizzazione trasversale sia originariamente avvenuta in un tratto di barra più vicino al nodo rispetto alla sezione in esame, per un carico di  $-118 \text{ KN}$ , e si sia quindi propagata fino alla sezione monitorata da E10 (posta a 15 cm dal filo esterno del pilastro) a seguito di un incremento di carico di  $7 \text{ KN}$ .

Proseguendo quindi nell'analisi del diagramma di figura 10.55 si nota come le rilevanti deformazioni registrate all'estradosso in corrispondenza dei carichi di segno positivo inducono, nell'arco del 1° ciclo della serie di carico *GG*, un ulteriore abbassamento dell'asse neutro ad una quota evidenziata dalla posizione **1** dallo schema di figura 9.61, ed un conseguente incremento degli allungamenti registrati sulle barre d'intradosso. L'elevato scorrimento plastico subito dalle barre integrative d'estradosso nel corso del 1° ciclo delle *serie GG* produce, nelle barre integrative d'intradosso, dilatazioni massime pari a circa  $2.600 \mu\epsilon$ , tali da indurre lo snervamento dell'acciaio.

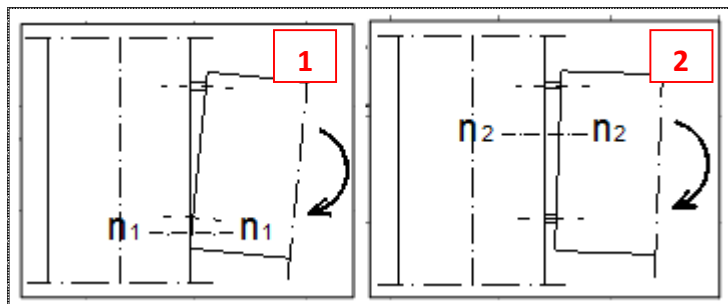


- **Figura 9.60** – Grafico delle letture effettuate dall'estensimetro E10 in funzione del carico di prova (serie GG-HH).

Il completamento del 1° ciclo di carico della serie GG produce, come detto, l'ulteriore escursione plastica delle deformazioni delle armature inferiori e la conseguente ingente fessurazione dell'intradosso, iniziando la formazione della cerniera plastica in corrispondenza della sezione di collegamento della trave, con conseguente innalzamento dell'asse neutro alla quota relativa alla posizione **2** dello schema di figura 9.61. Ne consegue che le deformazioni rilevate, in corrispondenza delle barre inferiori, durante l'applicazione dei carichi positivi, relativi agli ultimi ai successivi due cicli di carico della serie GG, tornino ad essere negative. Nel corso del 1° ciclo della serie di carico HH il successivo aumento di deformazione provoca nuovamente un abbassamento dell'asse neutro e le deformazioni ritornano positive. In corrispondenza del massimo carico negativo si ha poi la totale plasticizzazione della barra con conseguente scorrimento plastico. Il comportamento relativo ai successivi due cicli di carico della serie HH potrebbe essere influenzato da un malfunzionamento; ci saremmo aspettati infatti che la formazione della cerniera plastica avesse portato ad un nuovo innalzamento dell'asse neutro in corrispondenza della posizione **2** dello schema di figura



9.61 con deformazioni che sarebbero dovute tornare negative, come avvenuto nella serie di carico GG.

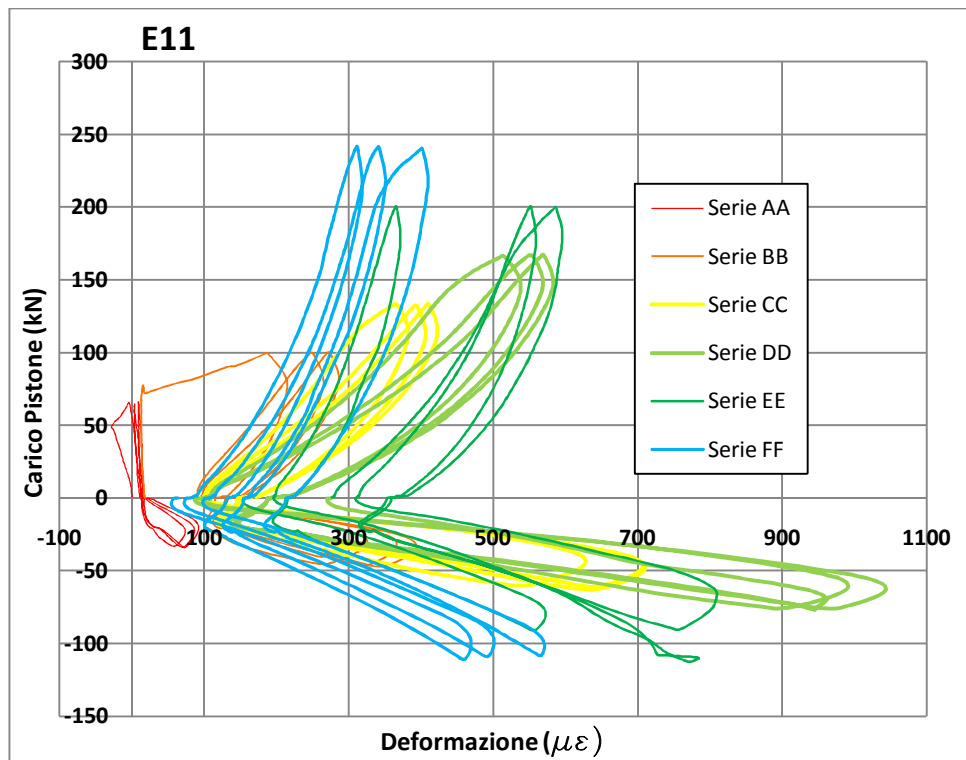


- **Figura 9.61** – Schema delle varie posizioni assunte dall’asse neutro durante la prova.

Per completare il quadro degli estensimetri posizionati sulla barra integrativa inferiore si analizzano le letture effettuate dall’estensimetro E11, riportate in figura 9.62 e 9.63.

L’estensimetro E11 è stato posizionato sulla barra integrativa inferiore, all’interno del nodo strutturale, a una distanza di 9,5cm dagli spezzoni di ancoraggio.

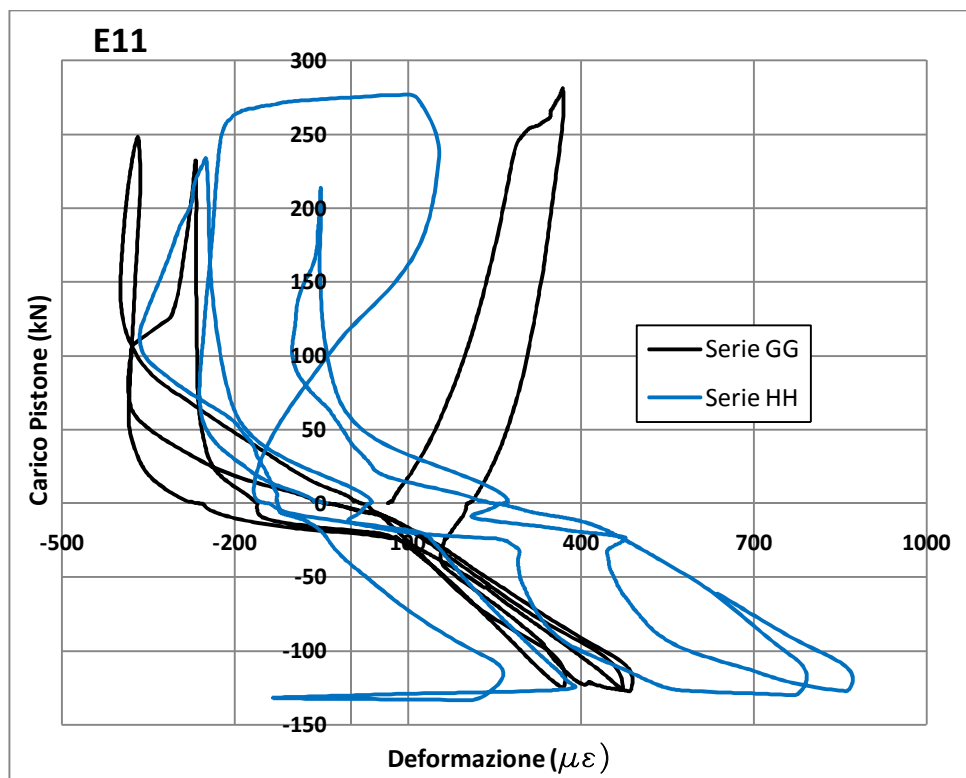
Dal grafico di figura 9.62 si nota come sin dal 1° ciclo della serie di carico AA, l’asse neutro si dispone al di sotto della barra causando deformazione di trazione per incrementi di carico positivo. Nelle prime sei serie di carico (AA-FF) i valori di deformazione per i massimi carichi positivi sono comparabili con quelli che si ottengono per i massimi carichi negativi.



- **Figura 9.62** – Grafico delle letture effettuate dall'estensimetro E11 in funzione del carico di prova (serie AA-FF).

Dal grafico di figura 9.63 si nota come nel 1° ciclo della serie GG, si ripete quanto avvenuto per l'estensimetro E10; si ha quindi un abbassamento dell'asse neutro in posizione **1**, con conseguente aumento di deformazione e successivamente grazie alla plasticizzazione delle armature che si trovano all'interno della trave, l'asse neutro si alza in posizione **2** (nello schema di figura 9.61) con conseguente passaggio da deformazioni da positive a negative.

Si noti infine come la barra all'interno e in prossimità dell'ancoraggio, risulti sempre ampiamente in campo elastico.

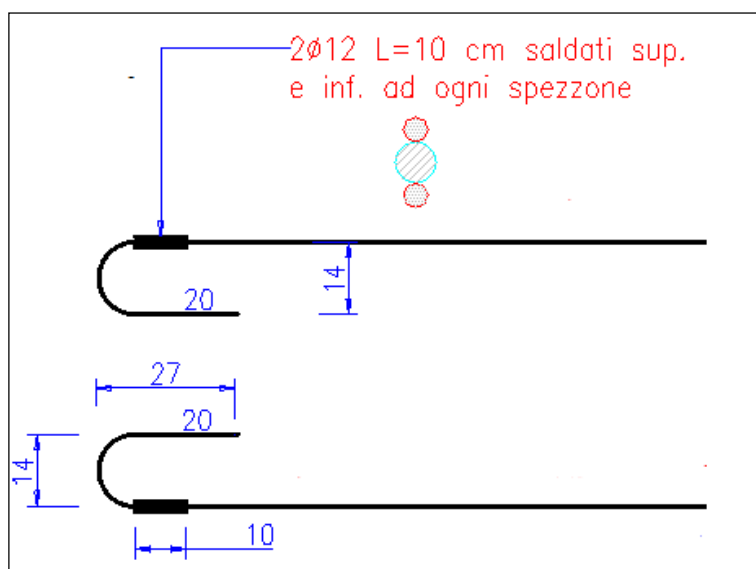


- **Figura 9.63** – Grafico delle letture effettuate dall'estensimetro E11 in funzione del carico di prova (serie GG-HH).

### 9.4.5 – Interazione Nodo-Ancoraggi barre integrative

Lo studio dell'interazione tra gli ancoraggi delle barre integrative e il collegamento strutturale costituisce uno dei punti chiave della prova svolta.

Gli ancoraggi per la prova in esame sono stati realizzati mediante piegatura a 180° delle barre  $\Phi 20$  di armatura integrativa, la lunghezza di ancoraggio dopo l'uncino è di 20cm; inoltre, per incrementare ulteriormente l'aderenza al calcestruzzo, sul fianco delle barre uncinate, sono state saldate 2 spezzoni di  $\Phi 12$  alla base dell'uncino (figura 9.64). Le barre uncinate sono state fissate mediante fil di ferro ad intervalli regolari e collegate trasversalmente, mediante 4 spezzoni  $\Phi 18$  di ancoraggio, in corrispondenza delle gole di piegatura, al fine di esercitare un'azione di contrasto e di diffusione delle compressioni sul conglomerato di nodo.

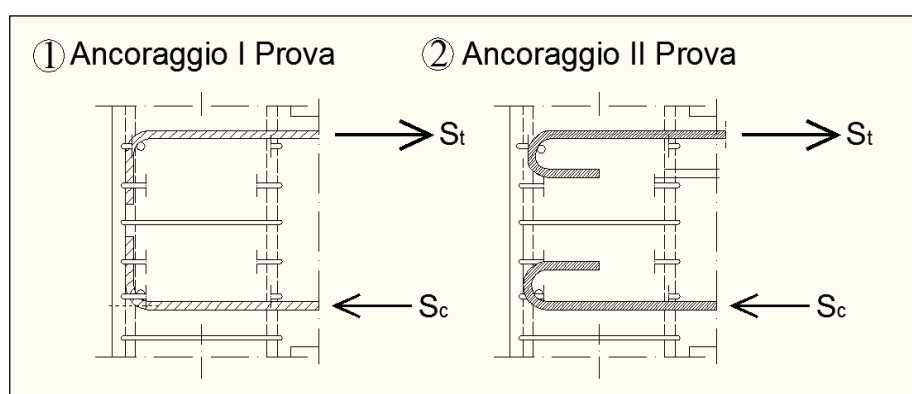


- Figura 9.64 – Schema delle barre integrative utilizzate nella prova in esame

Nel corso della I prova gli ancoraggi delle barre integrative di collegamento della trave al nodo venivano realizzati piegando a 90° il tratto finale, di 15 cm di lunghezza, di ogni barra; l'estremità della barra veniva quindi inserita nel nodo di collegamento accostando il tratto piegato, disposto verticalmente, alla superficie interna delle staffe (schema 1 di figura 9.65).

Tale ancoraggio aveva causato dei problemi in quanto si era verificato il raddrizzamento del tratto verticale dell'ancoraggio che aveva determinato, all'atto dello scorrimento, un'azione sul copriferro posteriore esterno del nodo generando la completa espulsione del copriferro stesso come (figura 9.66 e 9.67).

L'ancoraggio realizzato nella prova corrente (schema 2 di figura 9.65) prevede l'incremento sia della lunghezza che dell'angolo di piegatura del tratto estremo della barra, andando quindi a realizzare l'ancoraggio all'interno del conglomerato di nodo, sottoposto all'efficace confinamento fornito dalle staffe. In tal caso la sollecitazione degli'ancoraggi risulta diffusa sull'intero traliccio resistente di nodo.



- **Figura 9.65** – Schematizzazione del sistema d'ancoraggio utilizzato nelle due prove oggetto di studio.



- **Figura 9.66** – Espulsione del copriferro posteriore di nodo nel corso della I prova.

- **Figura 9.67** – Deformazione a fine prova degli ancoraggi di nodo delle barre integrative nella I prova.



Nel corso della prova in esame, per prima cosa sono comparse, durante la serie di carico GG, delle fessure orizzontali propagate dalle facce laterali del pannello di nodo come si vede nell'immagine di figura 9.68.

Nel corso della serie di carico II, quando si è portato il nodo a rottura, alcune di queste fessure si sono propagate verso l'alto portando al distacco parziale di una parte della superficie della faccia (figura 9.69).

Ne complesso si può affermare che il nuovo sistema di ancoraggio delle barre integrative abbia funzionato, non si sono registrati infatti scorrimenti elevati, come si può notare anche dalle rilevazioni effettuate dagli estensimetri.

Si può affermare quindi che gli ancoraggi ad uncino degli spezzoni di completamento limitano lo scorrimento relativo tra acciaio e calcestruzzo garantendo un completo sviluppo del campo plastico delle barre. Questo determina l'incremento della capacità della struttura di subire deformazioni prima della rottura e dunque di comportarsi in modo duttile.



- **Figura 9.68** – Fessurazione della faccia posteriore del nodo durante la serie di carico GG.



- **Figura 9.69** – Fessurazione della faccia posteriore del nodo a fine prova.

#### 9.4.6 – Interazione Nodo- Mensola

La mensola ricavata nel getto prefabbricato del pilastro, alla base dell'interruzione di getto destinata ad ospitare il collegamento di nodo, risulta necessaria in fase di assemblaggio in opera della struttura fungendo da appoggio per la trave prefabbricata. I carichi considerati nel suo dimensionamento risultano essere pertanto i pesi propri degli orizzontamenti che poggiano sulle ali laterali della trave prefabbricata, il peso della trave prefabbricata stessa ed il peso delle armature e del getto di completamento. Avvenuta la maturazione del getto integrativo il nodo di collegamento è in grado di garantire la continuità strutturale necessaria a supportare le azioni di progetto; tuttavia in presenza di sollecitazioni orizzontali di natura sismica l'applicazione di momenti flettenti che tendono le fibre d'estradosso della trave e di azioni taglianti dirette verso il basso vanno comunque a sollecitare, in prossimità del pilastro, la mensola. Per tale motivo la prova ciclica in esame si ripropone di valutare anche l'influenza della mensola nel meccanismo resistente del collegamento d'estremità.

La mensola, avente sezione trasversale quadrata di lato pari a 15 cm, risulta essere un elemento tozzo e come tale deformabile soprattutto a taglio; le armature trasversali in grado di svolgere la funzione di tiranti, nel meccanismo resistente a traliccio, sono costituite da 8 staffe verticali  $\varnothing 10$  a doppio braccio (vedi dettagli costruttivi al capitolo 2). Il comportamento a traliccio è stato evidenziato dalle osservazioni macroscopiche effettuate nel corso della prova, rilevando, in prossimità del massimo carico positivo applicato al 1° ciclo della serie GG, la comparsa della prima piccola fessura diagonale su una delle due facce laterali della mensola, parallela alla direzione di massima compressione (biella compressa del traliccio resistente), indicata con il numero 8 nello schema di fig. 9.22 e rappresentata in figura 9.70. In prossimità del massimo carico positivo applicato al 1° ciclo della serie HH, si ha l'apertura di un'altra fessura diagonale sulla seconda faccia laterale della mensola. Questo comportamento asimmetrico è stato causato probabilmente dalla disposizione della trave, la cui sezione non risultava perfettamente parallela al lato lungo della mensola.

L'applicazione dei carichi positivi, nel corso della serie di carico GG, produce, come già affermato in precedenza, l'inizio delle plasticizzazioni delle armature integrative superiori, provocando quindi un notevole incremento della rotazione della trave, come si vede in maniera evidente nel dal grafico rappresentativo del legame momento-rotazione relativo al primo concio di trave (rappresentato in figura 9.6).

Le deformazioni in gioco inducono sollecitazioni sempre maggiori nella mensola prefabbricata, determinando un evidente incremento delle fessurazioni nel corso dell'azione ciclica del carico e nel corso dell'incremento di carico successivo; nelle figure 9.71 e 9.72 è possibile notare l'elevata fessurazione presente durante le ultime fasi di carico ed al termine della prova, sia sulla faccia laterale che sullo spessore frontale della mensola, a testimonianza delle elevate tensioni raggiunte nei piani verticali, rispettivamente, paralleli e trasversali all'asse della trave.



- **Figura 9.70** – Fessurazione diagonale della mensola durante il 1° ciclo della serie GG.





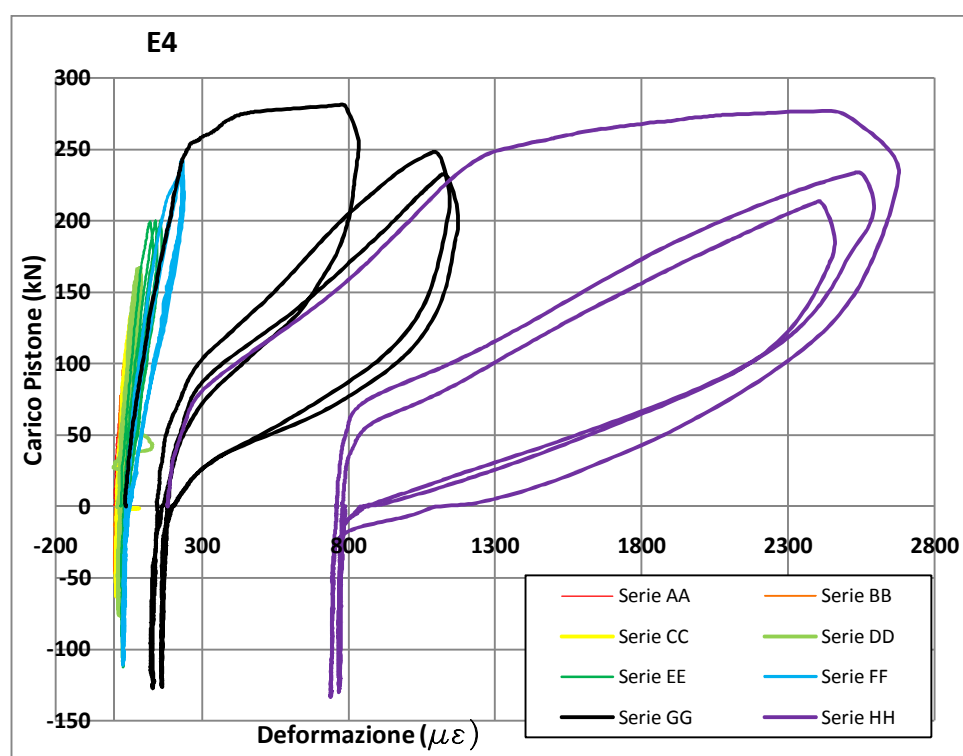
- **Figura 9.71** – Particolare della fessurazione della mensola a fine prova.

- **Figura 9.72** – Fessurazione della mensola a fine prova (vista globale).

Al fine di analizzare in maniera approfondita l'andamento delle sollecitazioni all'interno della mensola si è applicato un estensimetro sul braccio superiore della staffa centrale, denominato con la sigla E4.

In figura 9.73 sono riportate le letture effettuate dall'estensimetro E4 in funzione del carico di prova.

Si nota, anzitutto, come per le prime sei serie di carico (AA-FF) le deformazioni siano del tutto irrilevanti; il massimo valore raggiunto in corrispondenza del massimo carico positivo applicato nella serie FF è di soli  $242\mu\varepsilon$ . Per carichi di segno negativo le rilevazioni evidenziano, ovviamente, dei tratti verticali poiché la mensola non è soggetta a nessuna azione di carico; nelle serie di carico AA-FF non si sono rilevate deformazioni residue a carico nullo.



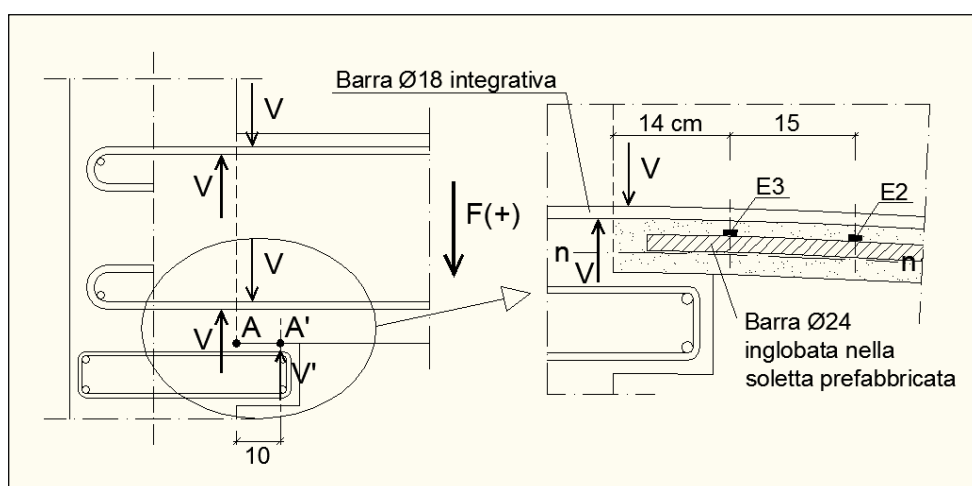
- Figura 9.73 – Grafico delle deformazioni rilevate dall'estensimetro E4 in funzione del carico di prova.



Le rilevanti deformazioni che si hanno nel 1° ciclo della serie di carico GG producono una deformazione massima di  $800\mu\varepsilon$ , in corrispondenza della quale si ha l'apertura della prima fessura; nei successivi cicli di carico della medesima serie si nota infatti l'abbattimento della pendenza delle curve di carico con un incremento di deformazione. Per carichi negativi si hanno invece tratti rettilinei con una deformazione residua a carico nullo di circa  $150\mu\varepsilon$ .

Nel corso del 1° ciclo della serie di carico HH, il notevole incremento de formativo ha causato il raggiungimento della soglia di snervamento nella barra, il livello deformativo ha raggiunto infatti i  $2650\mu\varepsilon$ . Si è verificata inoltre l'apertura di nuove fessure che hanno portato un ulteriore abbattimento della pendenza delle curve nei cicli successivi. Inoltre la plasticizzazione della barra porta ad avere deformazioni residue a carico nullo dell'ordine degli  $800\mu\varepsilon$ .

Un altro aspetto interessante consiste nell'indagare sull'influenza esercitata dalla reazione della mensola nel meccanismo resistente analizzando le letture degli strumenti posti sulla trave, in prossimità dell'appoggio alla mensola; si farà riferimento in particolar modo all'estensimetro E3 applicato alla barra centrale longitudinale inclusa nella soletta prefabbricata della trave, ad una distanza di 14 cm dal filo esterno del pilastro.

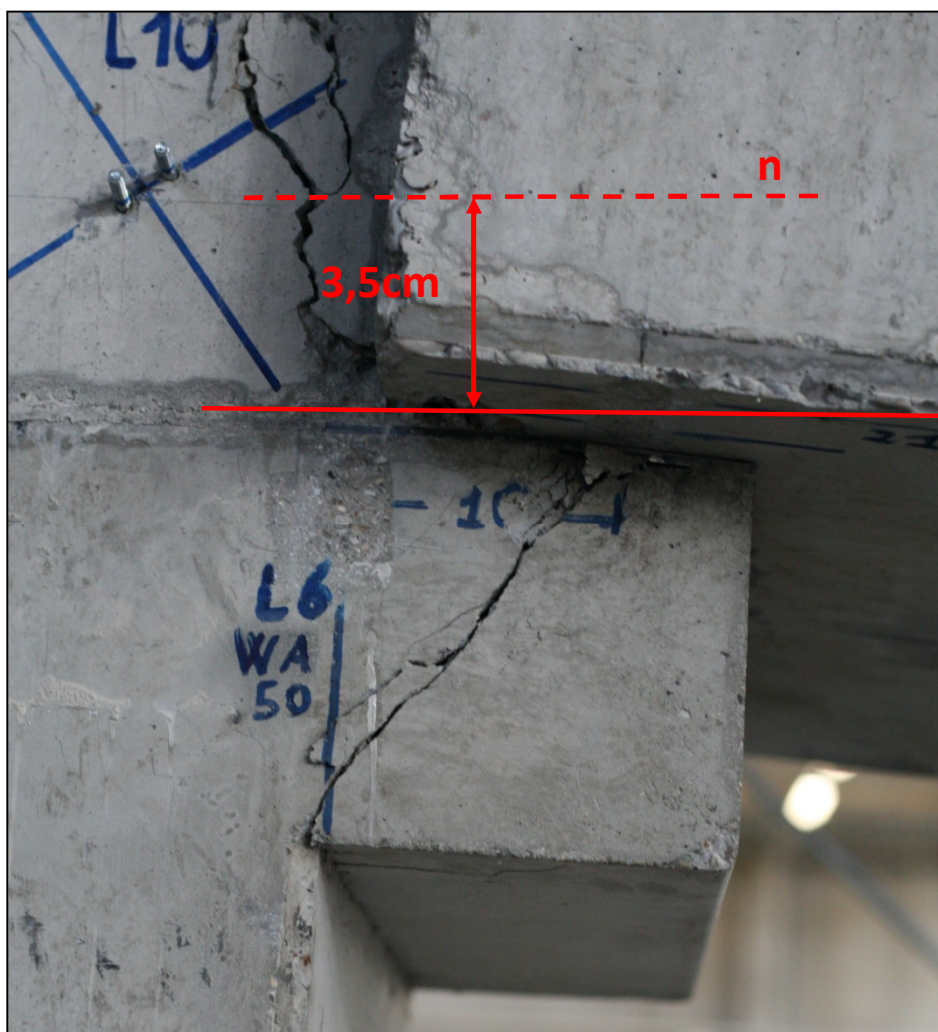


- **Figura 9.74** - Schematizzazione del contributo fornito dalla mensola all'atto della totale fessurazione della sezione di collegamento della trave.

La totale fessurazione verticale che si verifica nella sezione di collegamento della trave al pilastro, al termine del 1° ciclo della serie HH, affida di fatto la resistenza a flessione alle sole armature integrative, mentre la resistenza a taglio, oltre che dalle armature, è in parte fornita anche dall'ingranamento del calcestruzzo; la successiva distribuzione delle azioni verticali che si viene a creare, applicando carichi di segno positivo, è quella schematizzata in figura 9.74.

L'apertura delle fessure presenti all'estradosso genera un incremento di rotazione rigida della trave rispetto al pilastro, con fulcro nel punto A, mentre la deformazione delle barre a taglio genera una traslazione della trave verso il basso. La successiva ripetizione ciclica dei carichi genera un ampliamento di tali componenti di spostamento, inducendo quindi una sollecitazione verticale crescente nella mensola. La risultante che ne deriva viene applicata alla trave con un braccio esiguo, generando quindi delle sollecitazioni flessionali nel complesso trascurabili; tuttavia l'appoggio fornito in A' tende a ridurre la componente di abbassamento della trave e produce di fatto la traslazione del centro di rotazione della trave da A verso A'. Il primo tratto di soletta prefabbricata risulta pertanto indotto a sollevarsi rispetto al punto A, ma la presenza dell'effetto "bietta", fornito dalle armature integrative inferiori innestate nel nodo di collegamento, e dell'effetto "ingranamento", fornito soprattutto in corrispondenza di bassi valori di carico (e quindi di ridotta ampiezza della fessurazione) dalle superfici scabre di calcestruzzo della fessura, contrasta tale rotazione; viene quindi impressa un'accentuazione della curvatura locale della soletta che ne incrementa la trazione nelle fibre d'intradosso, poste al di sopra dell'asse neutro.

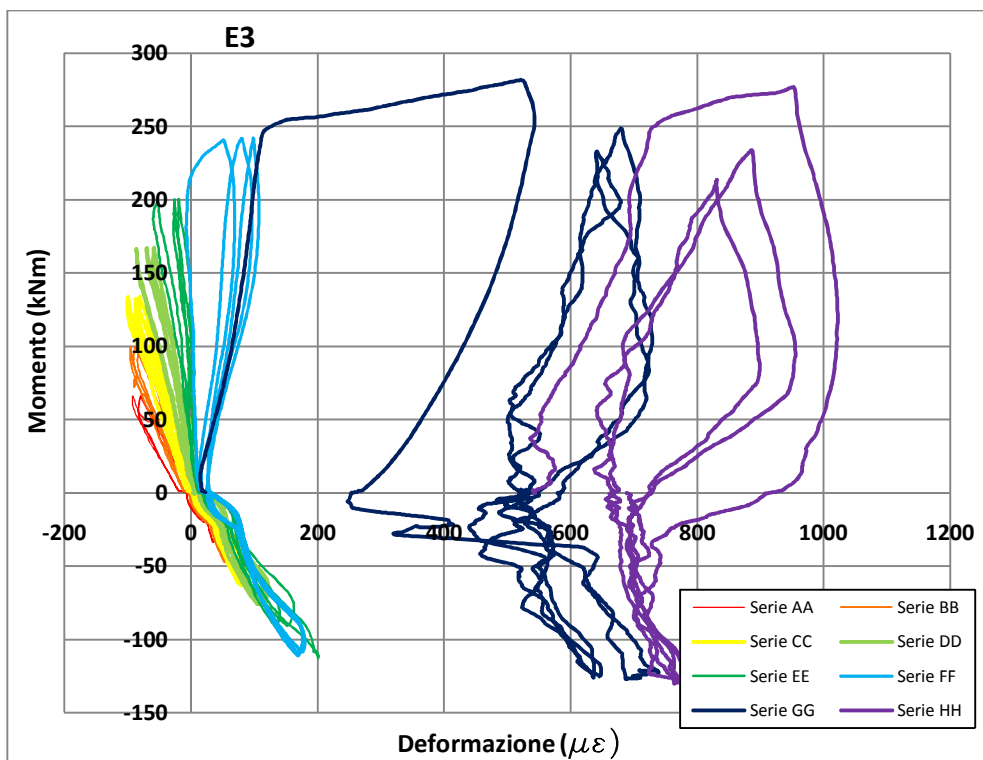
I meccanismi deformativi descritti potrebbero quindi essere alla base del notevole abbassamento subito dell'asse neutro in corrispondenza delle sezioni trasversali dei primi tratti di trave; come si può notare in figura 9.75 l'asse neutro, giungendo a circa 3,5 dall'intradosso della trave, passa addirittura al di sotto delle barre longitudinali di prefabbricazione, aventi asse posto a circa 4,5 cm dall'estradosso della soletta, generando deformazioni di trazione anche in corrispondenza di azioni positive di carico. Il primo tratto delle barre longitudinali di prefabbricazione risulta inoltre costretto a seguire la deformazione locale impressa alla soletta, con conseguenti aumenti di curvatura che, dato l'elevato diametro pari a 24 mm, generano ulteriori incrementi di deformazione superficiale della barra estesi anche al punto di applicazione di E3 (vedi schema di fig. 9.74).



- **Figura 9.75** – Particolare sulla posizione dell'asse neutro a fine prova.

La legittimità dei meccanismi deformativi fin qui ipotizzati risulta convalidata dall'analisi delle rilevazioni effettuate dall'estensimetro E3, rappresentate nel grafico di figura 9.76.

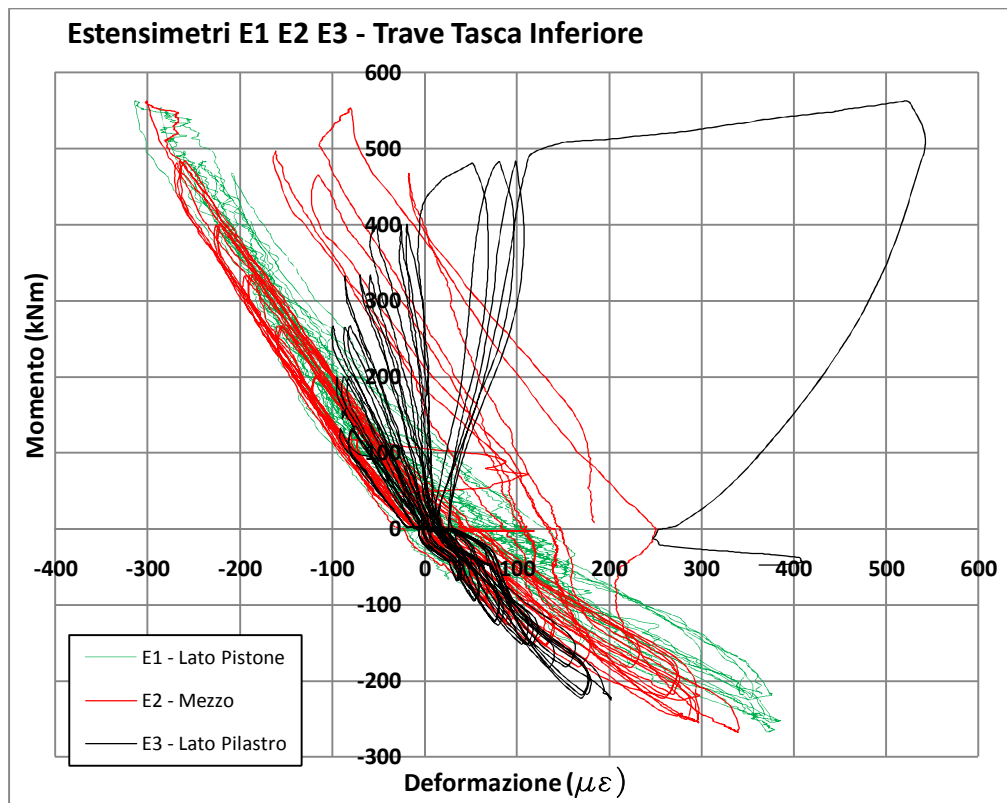
Si osserva anzitutto come, dal 1° ciclo della serie FF, si ha la presenza di dilatazioni anche per carichi applicati di segno positivo, in analogia con quanto rilevato in corrispondenza della stessa sezione trasversale per le barre integrative inferiori (vedi grafico relativo ad E10 di fig. 9.59 e 9.60). Tuttavia, tenuto conto della vicinanza dell'asse della barra all'asse neutro della sezione (vedi schema di fig. 9.74), la preponderanza delle dilatazioni rilevate in corrispondenza dei carichi positivi rispetto a quelle prodotte dai carichi negativi non può essere giustificata soltanto dall'abbassamento dell'asse neutro; appare quindi sensato imputare l'ulteriore amplificazione delle dilatazioni all'influenza della curvatura impressa alle barre dalla mensola, come descritto in precedenza.



- **Figura 9.76** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale, inclusa nella soletta prefabbricata della trave, rilevate dall'estensimetro E3 in funzione del carico di prova.

Ulteriore conferma della localizzazione degli effetti indotti dalla fessurazione della sezione di collegamento della trave e dell'influenza della mensola può essere dedotta dall'analisi del grafico di figura 9.77, nel quale si confrontano le rilevazioni effettuate in E3, posto a 14 cm di distanza dal pilastro, con quelle effettuate in E2 ed E1, posti rispettivamente a 29 cm e 44 cm dal pilastro.

Si nota infatti come, già a distanza di poche decine di centimetri dal pilastro, la variazione delle deformazioni torni ad assumere un andamento abbastanza lineare, evidenziando alternanza di dilatazioni e contrazioni in corrispondenza di carichi di segno opposto; solo in corrispondenza della sezione di applicazione dell'estensimetro E2, posto a 29 cm dal pilastro, si osserva la tendenza ad avere dilatazioni superficiali della barra anche per carichi di segno positivo all'atto dell'applicazione degli ultimi due cicli della *serie HH* e del ciclo della *serie II*.



. - **Figura 9.77** - Grafico delle deformazioni assiali della barra longitudinale, inclusa nella soletta prefabbricata della trave, rilevate dagli estensimetri E1, E2 ed E3 in funzione del carico di prova.

# MODELLAZIONE DEL NODO STRUTTURALE

Il presente capitolo ha lo scopo di illustrare una analisi numerica effettuata sul collegamento strutturale tramite la realizzazione di un modello semplificato agli elementi finiti.

Il metodo degli elementi finiti (FEM) è una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche. Il software utilizzato per l'analisi è *Sraus7* della HSH s.r.l. di Padova.

Gli obiettivi della modellazione numerica hanno riguardato principalmente lo studio della distribuzione delle tensioni nelle barre d'armatura e l'analisi dello scorrimento all'interfaccia acciaio-calcestruzzo alla base dell'apertura delle fessure.

L'analisi condotta è stata di tipo statica non-lineare con incrementi di carico.

Nel paragrafo 10.1 si fornisce una descrizione accurata del modello, concentrando l'attenzione su alcuni particolari curati nello sviluppo della mesh come l'interfaccia trave-mensola analizzata nel paragrafo 10.1.1 e l'interfaccia acciaio-calcestruzzo, analizzata nel paragrafo 10.1.2; nel paragrafo 10.2 si fornisce infine un'analisi dei risultati ottenuti.

## 10.1 – Descrizione del modello agli elementi finiti

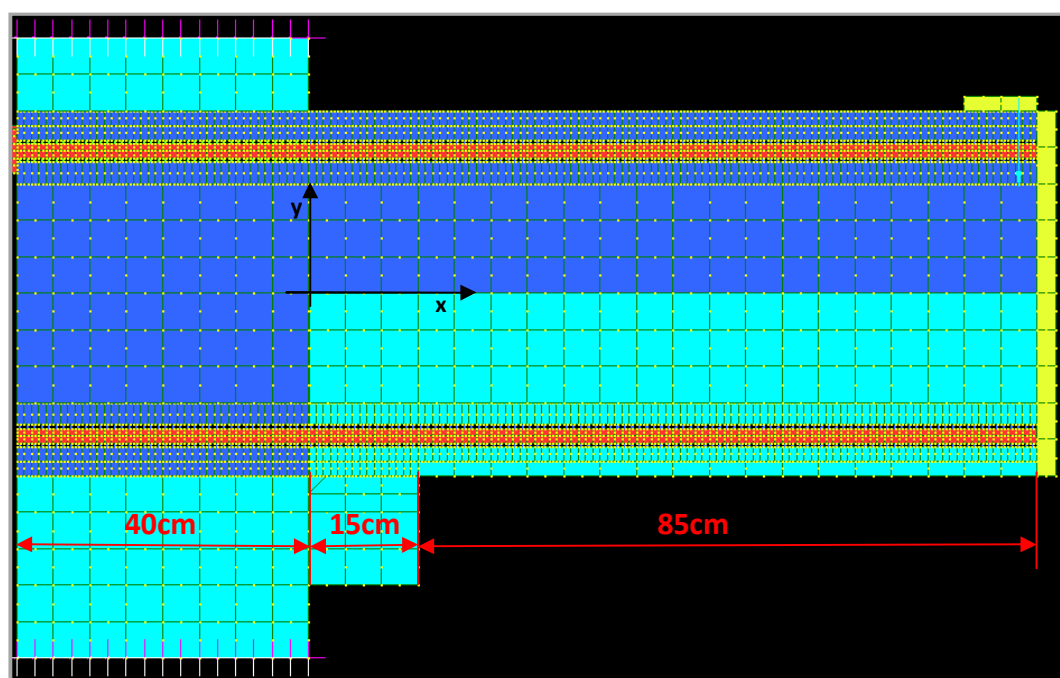
Per semplicità di realizzazione si è scelto di riprodurre il collegamento strutturale mediante un modello in 2D costituito principalmente da elementi plate ai quali sono state assegnate opportune *proprietà* ed *attributi*. E' facilmente intuibile, che le numerose semplificazioni effettuate nel rappresentare la struttura reale in due dimensioni, fanno sì che non tutti i risultati ottenuti possano descrivere correttamente quello che avviene nella realtà; le scelte effettuate nel semplificare il modello sono state comunque dettate dalla necessità di rendere, quanto più possibile attendibili, i risultati riguardanti gli aspetti su cui ci si è voluti focalizzare.

La vista globale della mesh realizzata per la simulazione, con l'indicazione delle misure, è riportata nell'immagine di figura 10.1.



Al fine di riprodurre in maniera accurata lo stato tensionale nelle barre d'armatura e l'andamento degli scorrimenti, il lato del pilastro è stato riprodotto per tutta la sua lunghezza di 40cm; la trave, invece, è stata modellata soltanto per la lunghezza 100cm dal filo del pilastro pari alla metà della lunghezza reale, questo perché ci si è voluti focalizzare principalmente su ciò che accadeva nella sezione d'attacco pilastro-trave. Si è scelto di riprodurre inoltre la mensola d'appoggio poiché, come descritto nel paragrafo 9.4.6, la sua presenza influenza molto lo stato tensionale e deformativo delle barre d'armatura inferiori.

Inoltre, per riprodurre le reali condizioni di vincolo nella struttura è stato necessario riprodurre una piccola parte del pilastro superiormente e inferiormente.



- Figura 10.1 – Vista globale della mesh realizzata per l'analisi agli elementi finiti

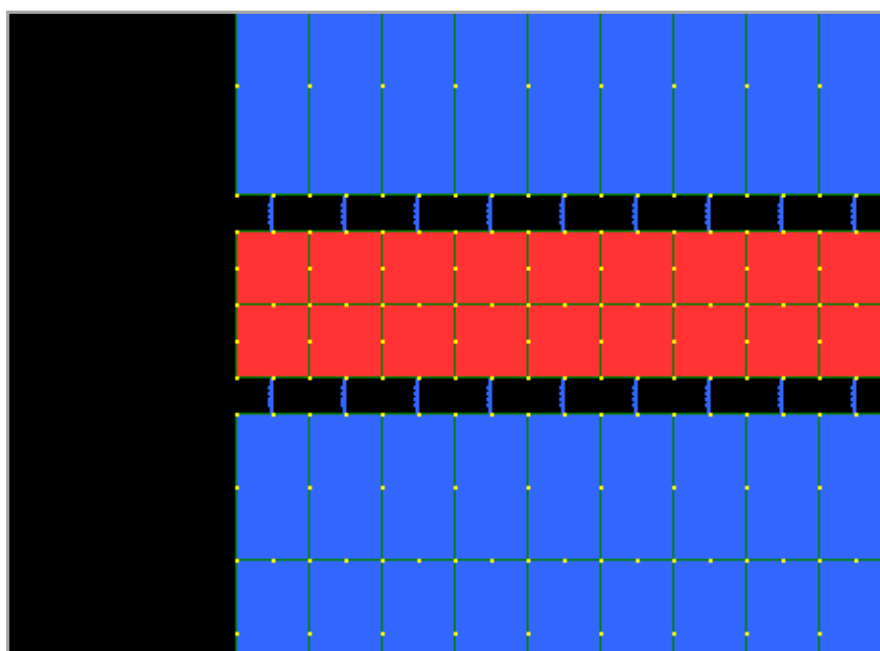
Un altro passo fondamentale nella definizione del modello consiste nel fornire opportune condizioni di vincolo. Come visibile anche dalla vista globale in figura 10.1, le due porzioni di pilastro riprodotte risultano incastrate superiormente e inferiormente. il pannello di nodo e le barre di armatura nella sezione di estremità sinistra risultano libere e le barre risultano vincolate al calcestruzzo per aderenza come descritto accuratamente al paragrafo 10.1.2.

Al fine di riprodurre accuratamente gli scorrimenti delle barre è stata effettuata una variante al modello originario descritto sopra. Le barre d'armatura integrative, infatti,

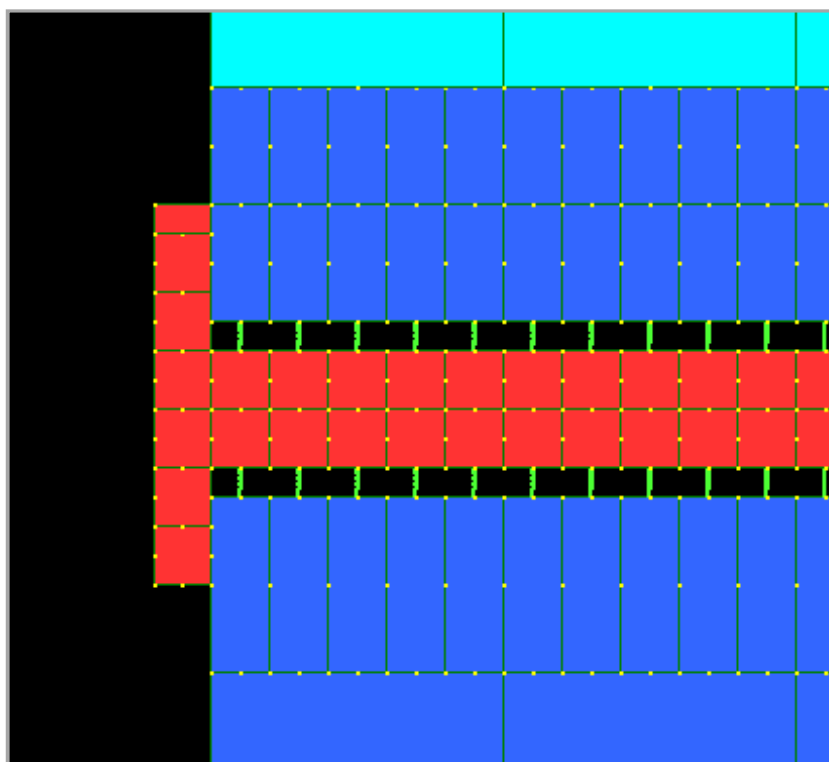
risultano, nella realtà, ancorate con un uncino a degli spezzoni integrativi posti trasversalmente alle barre stesse; tale vincolamento non corrisponde esattamente a lasciare libera l'estremità della barra come indicato sopra.

Per tali ragioni al modello originario, in cui le barre si ancorano al calcestruzzo esclusivamente per aderenza (particolare visibile in figura 10.2) è stata apportata una modifica ancorando le barre al calcestruzzo con una piastra d'acciaio (particolare visibile in figura 10.3). Il secondo caso risulta, probabilmente, più vicino alla realtà analizzata nella prova sperimentale in esame, mentre il primo caso risulterà probabilmente simile al caso analizzato nella prova precedente effettuata nell'inverno 2009 (si veda il paragrafo 9.4.5 riguardante gli ancoraggi delle barre integrative).

Al paragrafo 10.2.3 si analizzeranno le differenze, in termini di scorrimento, prodotte dai due diversi tipi di ancoraggio. Poiché tale modifica non ha portato alcun cambiamento significativo in termini di freccia e tensioni nelle barre i risultati analizzati riguardano comunque il modello originario.

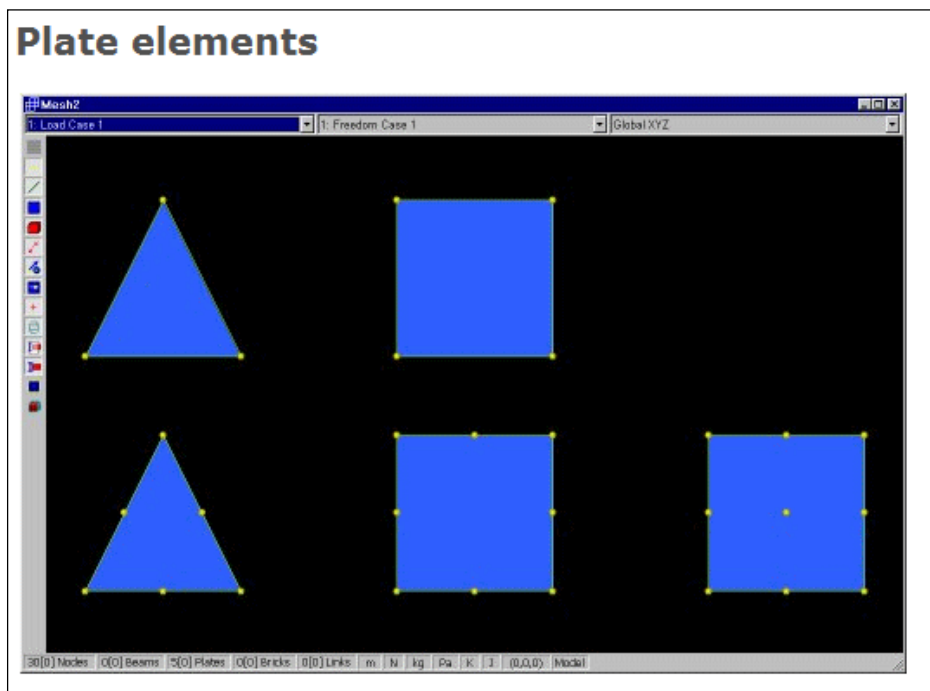


- **Figura 10.2** – Particolare del modello originario, con ancoraggio acciaio-calcestruzzo fornito esclusivamente dall'aderenza.



- **Figura 10.3** – Particolare del modello modificato, con ancoraggio acciaio-calcestruzzo fornito dall’aderenza e da una piastrina d’acciaio.

Gli elementi *plate* utilizzati per la realizzazione del modello sono principalmente *Quad8* cioè elementi rettangolari a 8 nodi. In alcuni casi specifici per garantire la congruenza si sono utilizzati elementi rettangolari *Quad4* o elementi triangolari *Tri3* e *Tri6*; nell’immagine di figura 10.4 sono rappresentati tutti i tipi di elementi *plate* realizzabili con Straus7.



- Figura 10.4 – Elementi plate realizzabili con Straus7

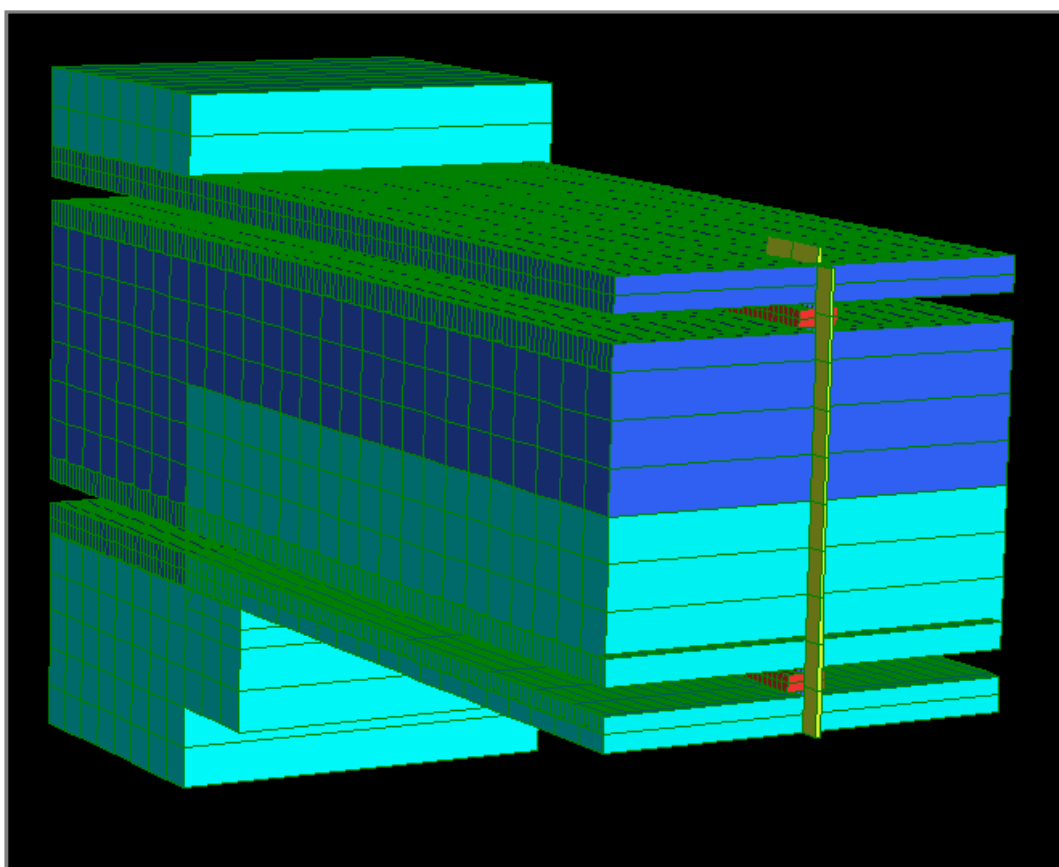
A ciascun elemento *plate* è possibile attribuire determinate proprietà, tra cui, ad esempio, il materiale, lo spessore della membrana, il legame sforzo-deformazione, moduli di elasticità; ciascun elemento *plate* avente determinate proprietà viene visualizzato con un colore diverso (come visibile nella figura 10.1).

Nella tabella di figura 10.5 sono riportate le principali proprietà degli elementi *plate* utilizzati per costruire il modello.

	Plate Proprety 1	Plate Proprety 2	Plate Proprety 3
Colore			
Materiale	CLS $f_c=32MPa$	CLS $f_c=40Mpa$	Acciaio
Modulo di Young [Mpa]	30960	34290	200000
Coefficiente di Poisson	0.2	0.2	0.25
Spessore [cm]	60	60	10

- Figura 10.5 – Tabella delle proprietà assegnate agli elementi plate presenti nel modello.

Come si vede dalla tabella sono stati utilizzati due tipi di proprietà diverse per il calcestruzzo del getto di completamento (*plate propriety 1*) e il calcestruzzo di prefabbricazione (*plate propriety 2*) per tener conto appunto dei differenti valori di resistenza. A ciascun materiale è stato assegnato, inoltre, uno spessore opportuno che nel caso in esame corrisponde a 60cm per il calcestruzzo e 10cm per l'acciaio; tale assegnazione è stata fatta considerando i rapporti tra le aree di calcestruzzo e acciaio della struttura reale. La precisione con cui sono stati assegnati gli spessori non è comunque di fondamentale importanza ai fini dei risultati che si vogliono ottenere. In figura 10.6 è rappresentata una vista del modello che permette di osservare gli spessori assegnati ai vari materiali.



- Figura 10.6 – Vista globale della mesh e degli spessori assegnati.

L'analisi condotta è di tipo statica-non lineare. Nella tabella di figura 10.7 sono riportati i 13 incrementi di carico effettuati; a ciascun incremento di carico corrisponde un determinato momento nella sezione d'attacco trave-pilastro.

Si nota che per semplicità è stato previsto un solo ramo di carico che partendo da un valore nullo, raggiunge un momento positivo di 563.5KNm, praticamente sullo stesso livello del momento massimo registrato durante la prova nella sezione d'attacco trave-pilastro di 562KNm.

Increment	$\lambda$	F[kN]	M[kNm]
1	0.075	37.5	36.56
2	0.15	75	73.13
3	0.225	112.5	109.69
4	0.3	150	146.25
5	0.375	187.5	182.81
6	0.45	225	219.38
7	0.525	262.5	255.94
8	0.6	300	292.50
9	0.7	350	341.25
10	0.82	400	399.75
11	0.91	450	443.63
12	0.99	500	482.63
13	1.16	550	563.50

- Figura 10.7 – Tabella degli incrementi di carico.

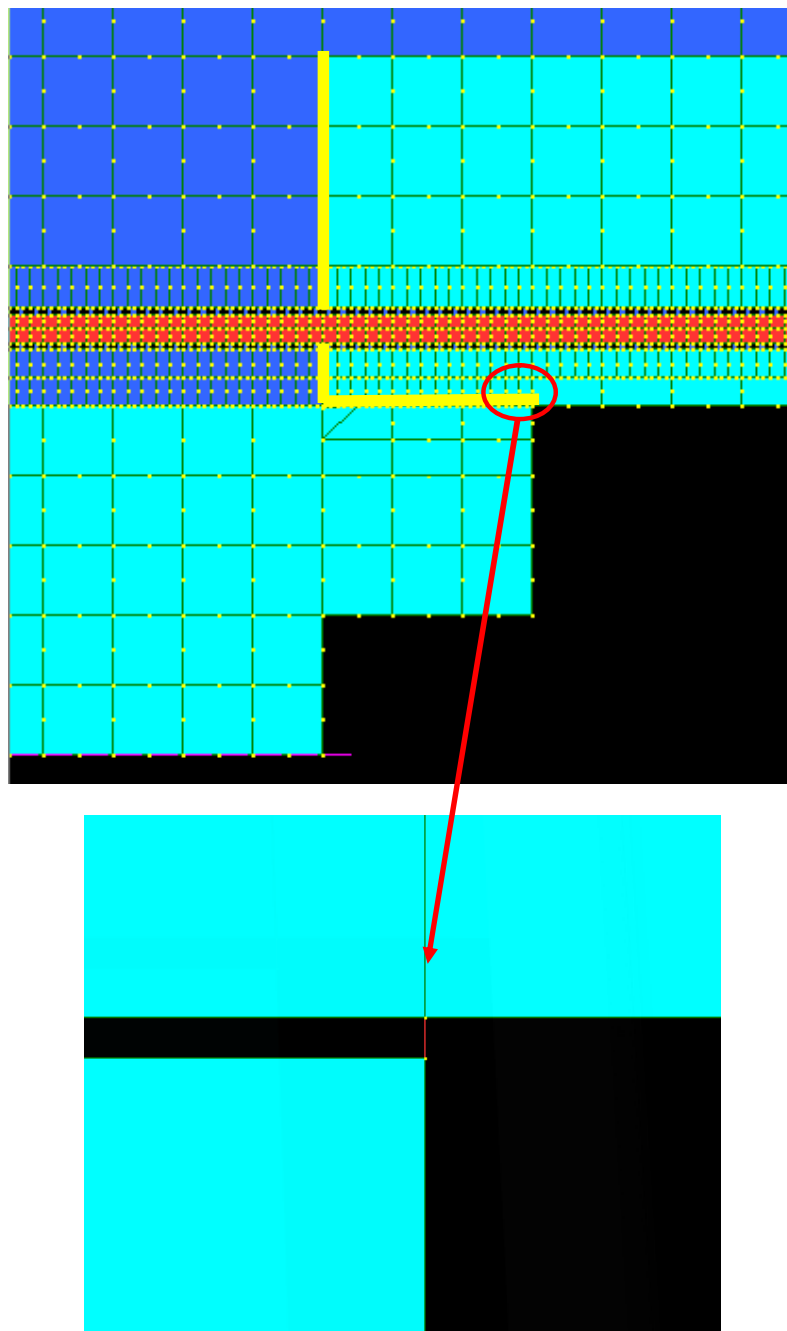


### 10.1.1 – Interfaccia Trave-Mensola

Un aspetto molto importante nella definizione del modello riguarda l'interfaccia trave-mensola. La trave, infatti, nella prova sperimentale effettuata, risultava appoggiata sulla mensola prefabbricata e come analizzato nel paragrafo 9.4.6, la sua presenza ha un contributo fondamentale nella diffusione delle tensioni nelle barre inferiori della trave.

Ai fini della modellazione è fondamentale che, essendo le due superfici a contatto semplicemente appoggiate, queste possano scambiarsi esclusivamente sollecitazioni di compressione. Tale tipo di contatto è da ritenersi valido anche per l'interfaccia tra il tratto inferiore della trave e il pilastro. In figura 10.8a sono riportate in giallo le superfici interessate da questo tipo di contatto.

Per simulare questo tipo di condizione tramite Sraus7 si fa uso degli elementi *beam* di tipo "*point contact – normal*". Un elemento di contatto di questo tipo è attivo (c'è rigidità) solo quando è in compressione, cioè quando la distanza tra i due nodi è minore di quella iniziale. Quando l'elemento è attivo esso può fornire un contributo di rigidità in direzione sia assiale che laterale (figura 10.8b).



- **Figura 10.8a** – Superfici con contatto di tipo “point contact-normal”

- **Figura 10.8b** – Particolare degli elementi beam utilizzati per simulare il contatto

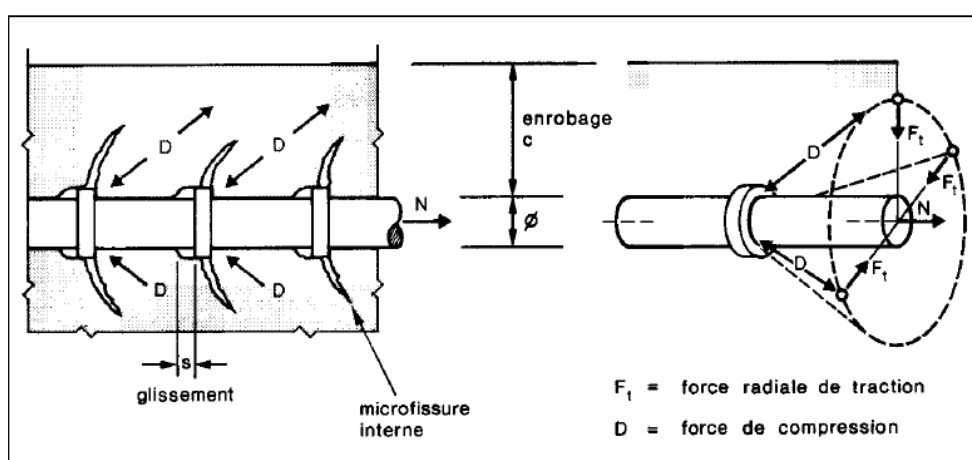
### 10.1.2 – Interfaccia acciaio-calcestruzzo

La modellazione dell'interfaccia acciaio-calcestruzzo costituisce la parte fondamentale di questa analisi; in termini di risultati infatti, si è cercato di focalizzare l'attenzione proprio sull'andamento dello scorrimento tra questi materiali, per poi poter fare alcune considerazioni sulla fessurazione della trave.

Per descrivere il fenomeno della fessurazione in un elemento c.a. è necessario tenere in conto lo scorrimento relativo tra barre di armatura e calcestruzzo.

Lo scorrimento si manifesta, ovviamente, a cause della non perfetta aderenza tra acciaio e calcestruzzo che porta ad avere deformazioni differenti per i due materiali.

Il meccanismo di aderenza acciaio-calcestruzzo è complesso, soprattutto per barre ad aderenza migliorata, come si vede nell'immagine di figura 10.9. Per livelli molto bassi di sollecitazione l'adesione è di tipo chimico sulla superficie delle barre; già per carichi di servizio avviene una micro fessurazione del calcestruzzo, con formazione di bielle di compressione in corrispondenza dei denti delle barre. Tale meccanismo si espleta con efficacia soprattutto se il calcestruzzo è ben confinato da staffe.



- Figura 10.9 – Meccanismo di aderenza acciaio-calcestruzzo per barre ad aderenza migliorata

Il legame costitutivo, che esprime la dipendenza della tensione tangenziale  $\tau$  dallo scorrimento  $s$  nella zona d'interfaccia è detta legge *bond – slip*; tale legge è molto complessa specialmente per carichi ciclici, come tipicamente nel caso di azioni di tipo sismico; il ramo crescente è schematizzato dal CEB Model Code nella forma:

$$\tau(s) = \tau_{max} \cdot \left( \frac{s}{s_{max}} \right)^\alpha$$

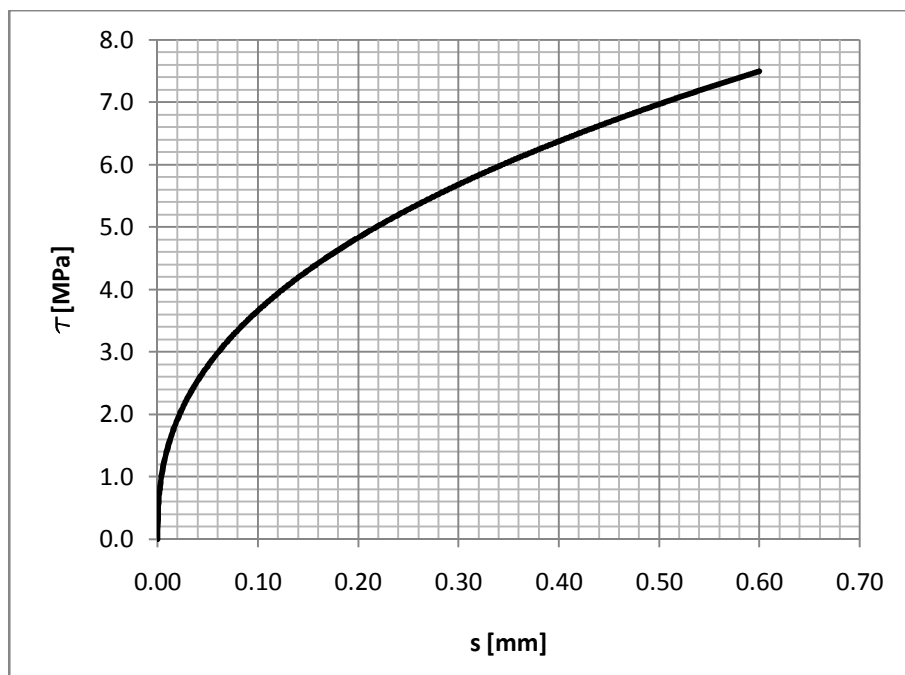
dove:

- $\tau_{max} = 1 \div 2.5\sqrt{f_{ck}}$  [MPa]
- $s_{max} = 0.6 \div 1mm$  in funzione del livello di confinamento
- $\alpha = 0.4$ .

Per il caso in esame, tale legge può essere calcolata assumendo :

- $\tau_{max} = 7.5 MPa$
- $s_{max} = 0.6mm$
- $\alpha = 0.4$ .

Nel diagramma di figura 10.10 è rappresentata quindi la legge bond-slip calcolata per il modello in esame.



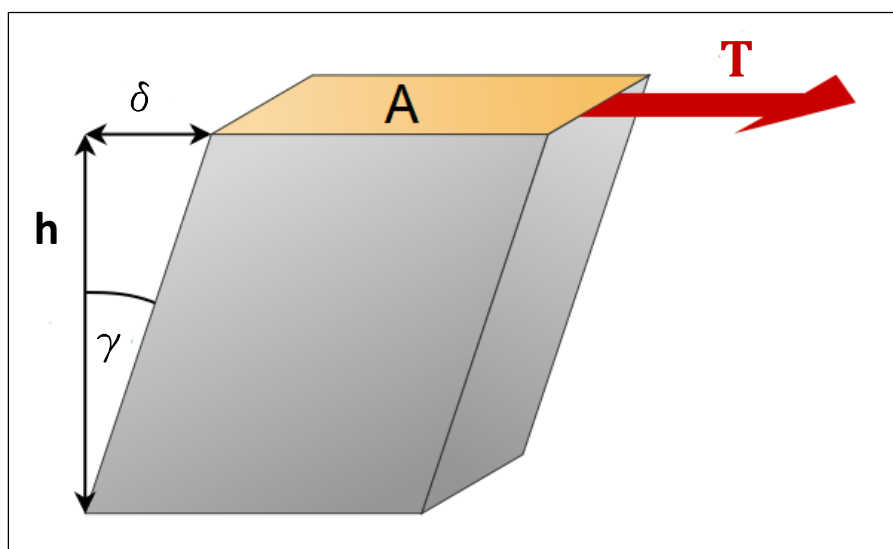
- Figura 10.10 – Legame bond-slip per il caso in esame

Una volta calcolata la legge *bond-slip* per il caso in esame, il passo successivo consiste nella modellazione dell'interfaccia acciaio-calcestruzzo. A questo proposito si è pensato di inserire tra acciaio e calcestruzzo degli elementi *beam* di tipo “spring” (particolari

visibili nelle figure 10.2 e 10.3) che possano fungere come dei pendoli aventi una certa rigidità laterale (*lateral stiffness*); in questo modo tali elementi si comportano come un elemento tozzo che si deforma a taglio.

Si consideri ad esempio l'immagine di figura 10.11 che rappresenta un elemento tozzo che si deforma a taglio, per tale elemento vale la relazione:

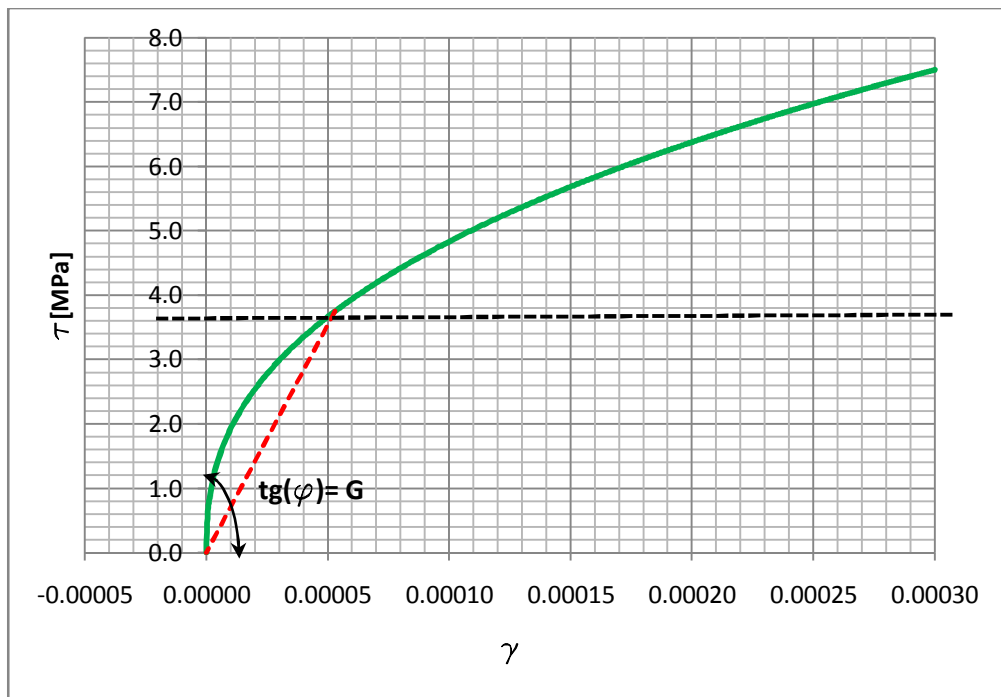
$$\tau = G\gamma \quad \text{dove} \quad \tau = \frac{T}{A} ; \quad \gamma = \frac{\delta}{h}$$



- Figura 10.11 – Elemento tozzo deformabile a taglio

Per poter dare quindi, agli elementi beam inseriti nel modello, una rigidità laterale rappresentativa del legame *bond-slip* bisognerà per prima cosa passare da un legame  $\tau$ -s a un legame  $\tau$ - $\gamma$  per poter calcolare il modulo di rigidità tagliante ( $G$ ) appropriato.

Il legame  $\tau$ - $\gamma$  è visibile nell'immagine di figura 10.12; per passare da s a  $\gamma$  si considera che  $\gamma = \frac{\delta}{h}$  ; inoltre si deve considerare che, essendo interessati al contributo di scorrimento di ciascun elemento *beam*, bisognerà dividere  $\gamma$  anche per il tratto di lunghezza interessata.



- Figura 10.12 – Legame  $\tau$ - $\gamma$  per un elementino beam utilizzato.

La linea tratteggiata in rosso rappresenta la rigidezza secante al 50% , che verrà utilizzata nel caso in esame.

Tale rigidezza corrisponde a un modulo di elasticità tagliante  **$G = 65700 \text{ MPa}$** .

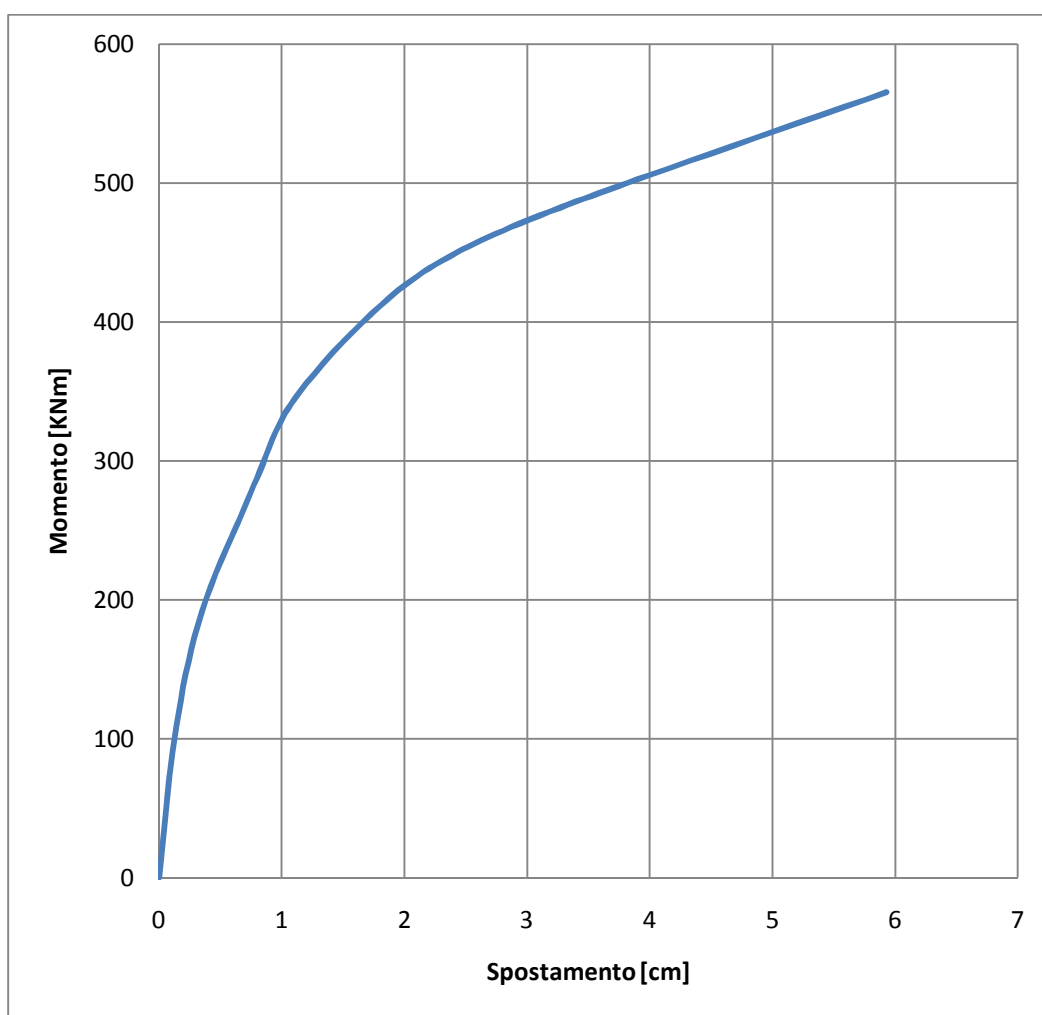


## 10.2 – Analisi dei risultati

In questo paragrafo si analizzeranno i principali risultati relativi alla modellazione effettuata.

### 10.2.1 – Diagrammi Forza-Spostamento

Il primo dei risultati ottenuti riguarda il diagramma tra la forza applicata e lo spostamento dell'estremità della trave. In figura 10.13 è riportato il digramma *momento-spostamento*, essendo il momento flettente nella sezione d'attacco pilastro-trave il parametro di forza che risulta confrontabile con i dati sperimentali.



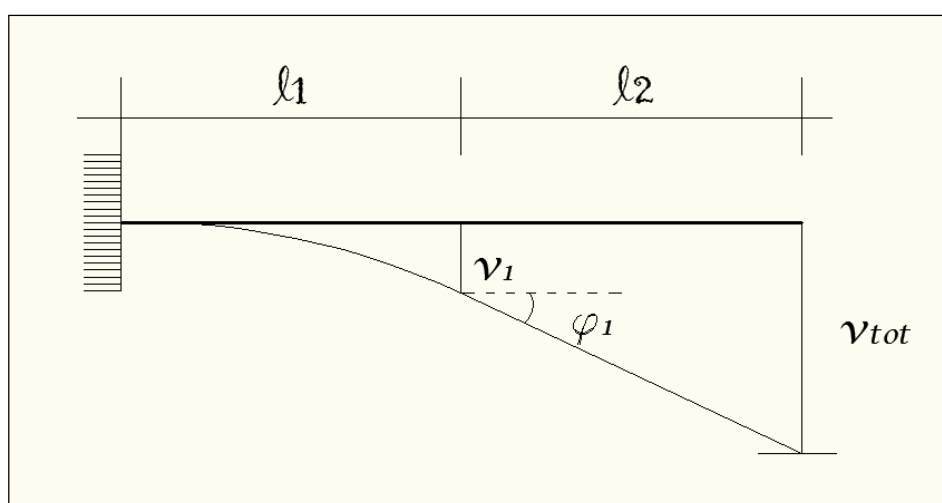
- **Figura 10.13** – Diagramma tra lo spostamento d'estremità e il momento nella sezione d'attacco trave-pilastro per il modello realizzato.

Si nota come la curva ottenuta risulti non lineare presentando un rigidezza maggiore per i primi incrementi di carico che tende poi a diminuire leggermente all'aumentare dello stesso. Tale comportamento è dovuto alla non linearità del legame *sforzo-deformazione* utilizzato per il calcestruzzo e per l'acciaio; in particolare al calcestruzzo è stato fornito un legame trilineare con l'ultimo tratto leggermente incrudente; per l'acciaio invece è stato utilizzato un legame bilineare *elasto-plastico* incrudente.

Nel modello realizzato, per semplicità, la trave è stata realizzata con una lunghezza pari a un metro, nella prova sperimentale invece la lunghezza effettiva della trave è di due metri. Per questo motivo, per poter confrontare il diagramma momento-spostamento del modello con quello del caso sperimentale, è necessario cercare di rendere confrontabili gli spostamenti.

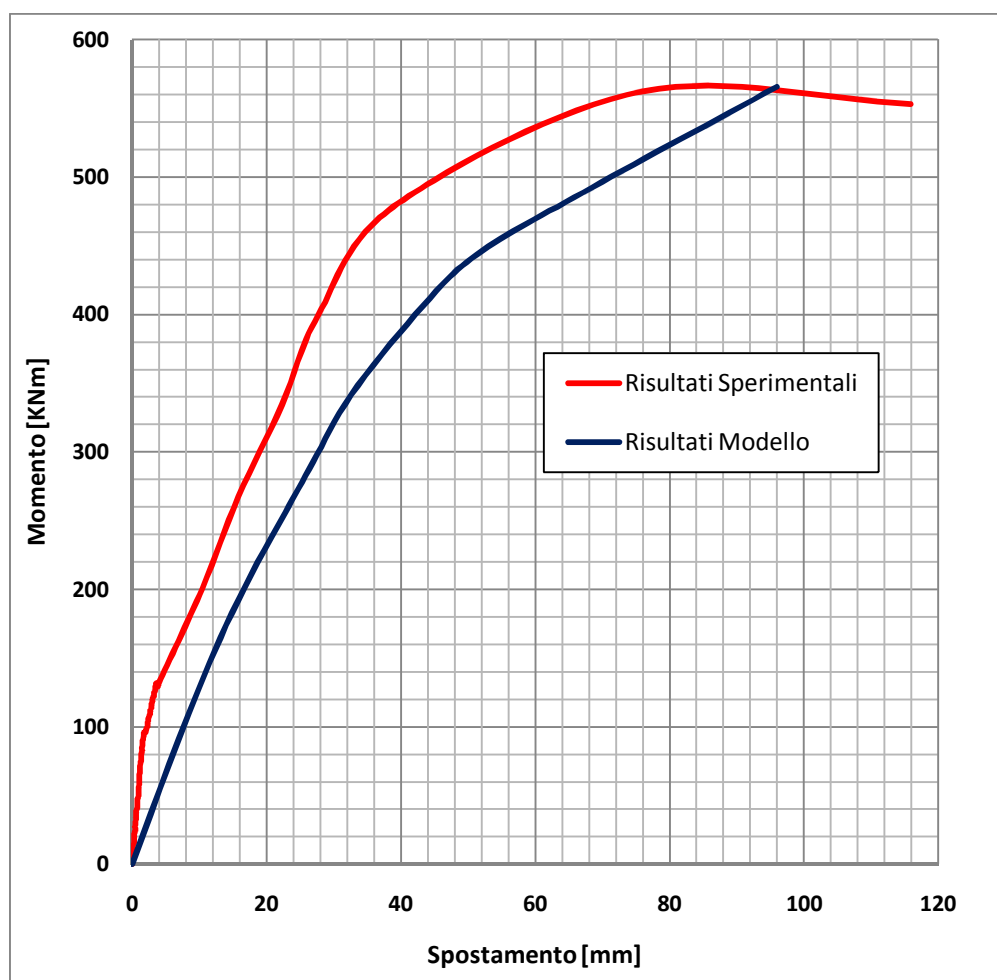
A questo proposito, si può ipotizzare che l'ultima parte della trave si deformi avendo una componente rigida e una componente elastica. Nello schema esplicativo di figura 10.14 consideriamo che  $v_1$  sia l'abbassamento dell'estremità del modello realizzato (rappresentato nel diagramma di figura 10.13) per il quale vale  $l_1 = 100\text{cm}$ , il contributo della componente di moto rigido sarà dato da  $v_2 = \varphi_1 l_2$ , mentre il più piccolo ma comunque confrontabile valore dovuto dalla componente elastica vale  $v_3 = \frac{M}{EI} l_2^2$ ; per cui lo spostamento totale risulterà:

$$v_{tot} = v_1 + v_2 + v_3 = v_1 + \varphi_1 l_2 + \frac{M}{EI} l_2^2$$



- Figura 10.14 – Schema esplicativo dell'abbassamento di estremità della trave

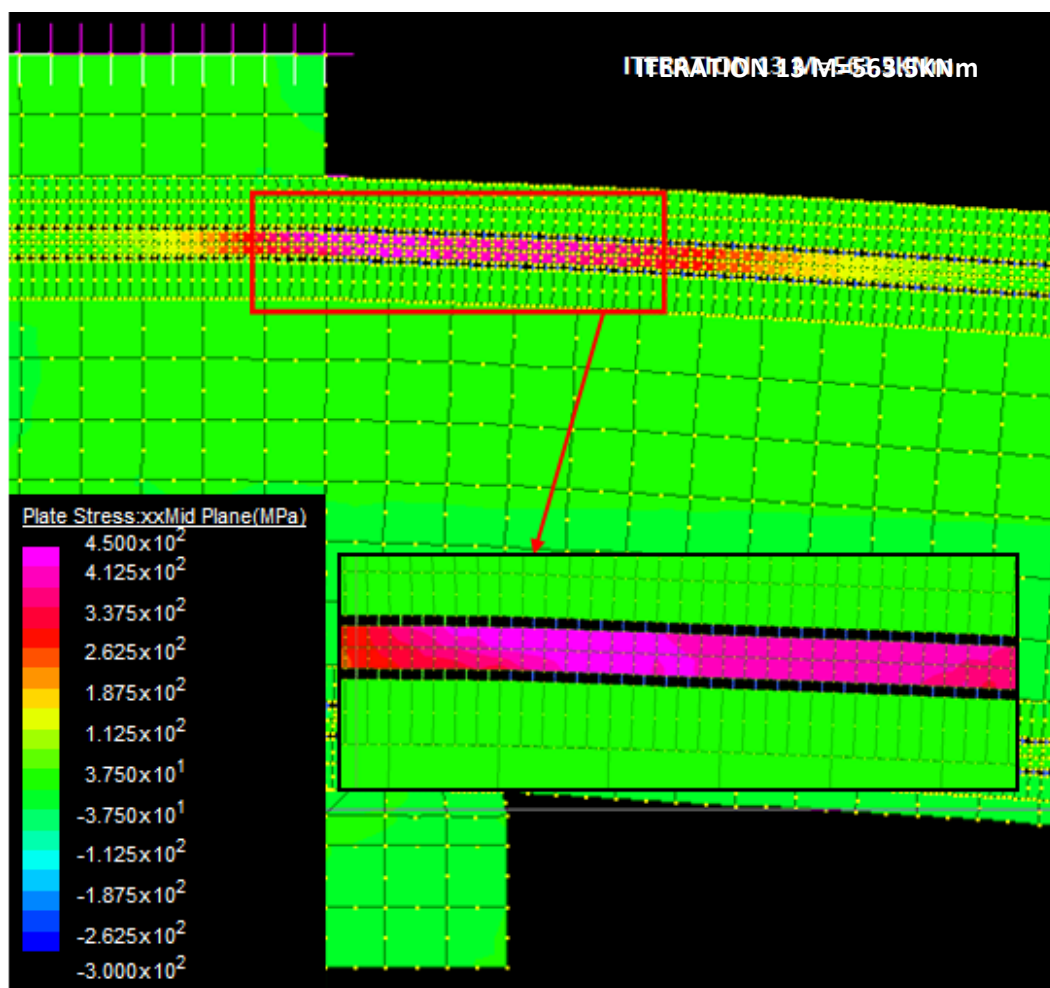
Una volta calcolato lo spostamento totale  $v_{tot}$  è possibile rappresentare il diagramma momento-spostamento così ottenuto con il diagramma momento-spostamento sperimentale. Nel diagramma di figura 10.15 sono riportate entrambe le curve con differenti colorazioni. Si può notare come, nel tratto iniziale, la curva relativa ai risultati sperimentali sia più rigida; le numerose semplificazioni effettuate hanno quindi inciso molto nel cogliere il comportamento nello stadio non fessurato della struttura. Superato il momento di fessurazione la rigidezza della modello e quella del caso reale risultano praticamente identiche poiché le curve hanno andamenti paralleli. Si nota infine come il valore del momento per cui si arriva alla plasticizzazione completa della struttura risulti inferiore per il modello analizzato. Considerando le numerose semplificazioni effettuate nella modellazione ci si può ritenere soddisfatti dei risultati ottenuti.



- **Figura 10.15** – Diagramma tra lo spostamento d'estremità e il momento flettente per la prova sperimentale (in rosso) e per il modello (in blu).

### 10.2.2 – Andamento delle tensioni

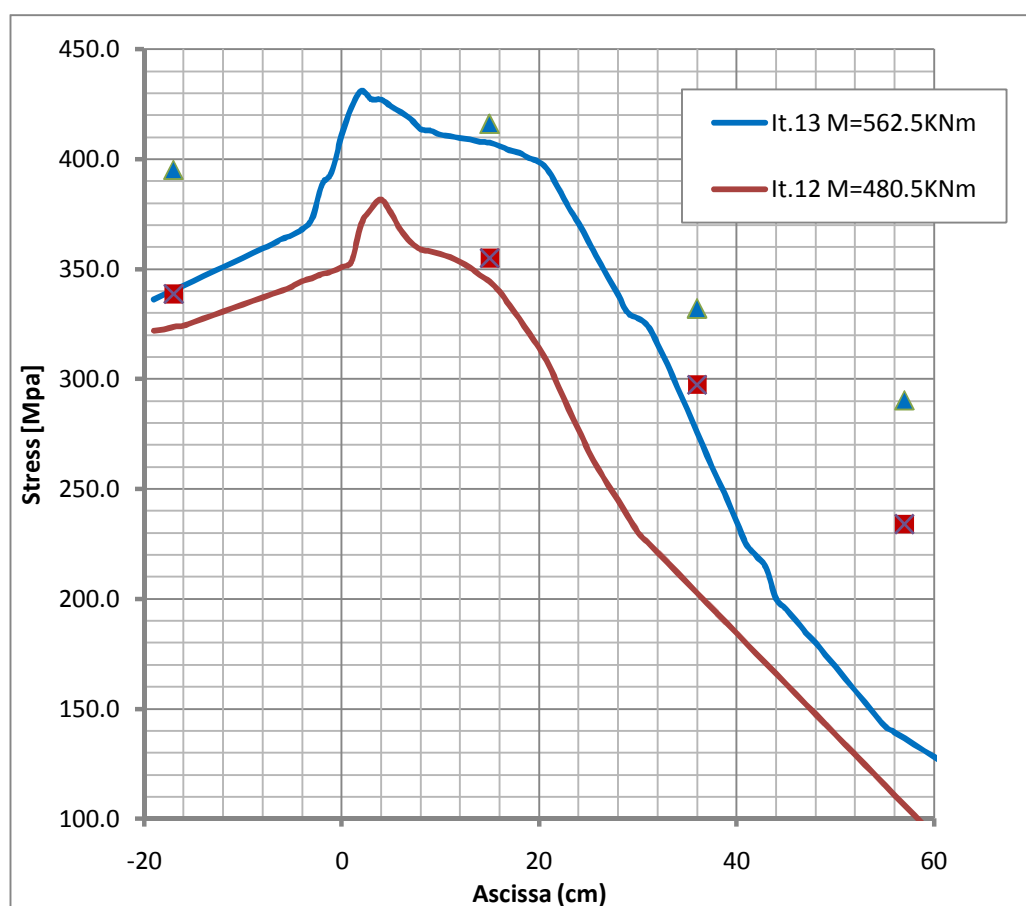
In figura 10.16 è rappresentato l'andamento delle tensioni nel piano xx. La scala è stata adattata in modo da enfatizzare i risultati all'interno della barra. Come si può notare i valori più alti sono concentrati nei pochi centimetri successivi all'attacco trave – pilastro; si può ipotizzare, infatti, che la plasticizzazione delle barre superiori sia iniziata proprio nello spazio compreso tra la sezione d'attacco trave – pilastro e i 10cm successivi, per poi estendersi nei successivi 20cm di barra.



- Figura 10.16 – Distribuzione delle tensioni [stress xx] nelle barre.

L'andamento delle tensioni all'interno della barra è stato schematizzato nel diagramma di figura 10.17, dove è riportato il livello tensionale all'interno della barra superiore in funzione dell'ascissa per gli ultimi 2 incrementi di carico. Nello stesso diagramma sono riportate le letture sperimentali effettuate dagli estensimetri presenti sulla barra superiore per il momento flettente corrispondente a quello per cui sono state calcolate le curve del modello; tali letture sono state ottenute moltiplicando il valore di

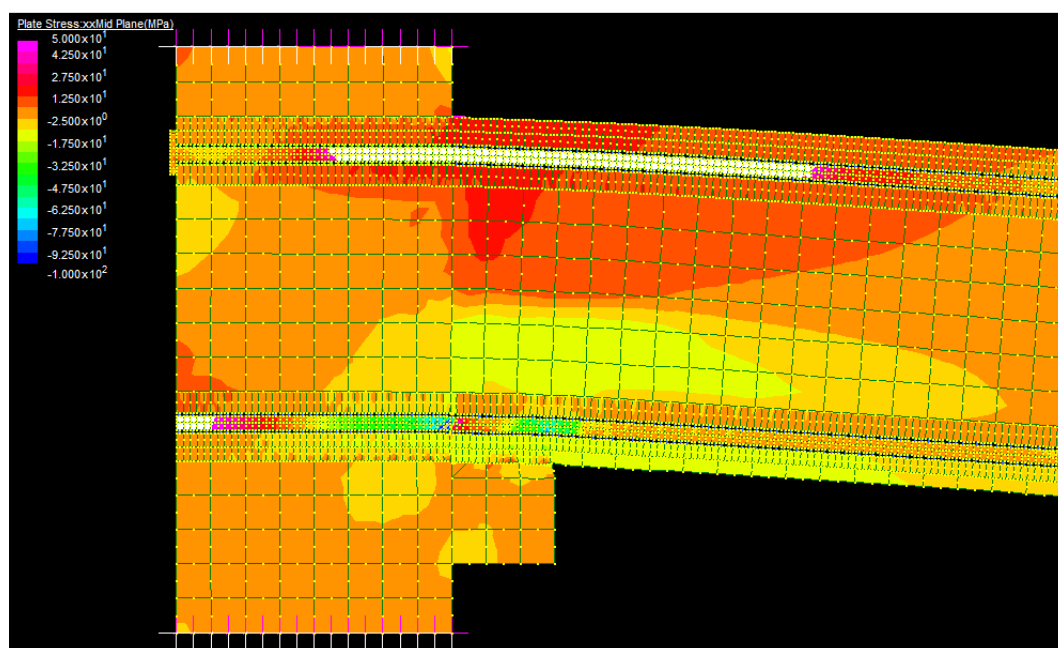
deformazione rilevato dagli estensimetri per il modulo di elasticità dell'acciaio. Si nota come in genere tali valori risultino molto vicini nel tratto di barra vicino alla sezione di attacco trave-pilastro (0-20cm); successivamente tali valori differiscono maggiormente, in particolare dalle letture degli estensimetri derivano dei livelli tensionali più elevati. Tale differenza nella distribuzione tensionale, che si nota allontanandosi dalla sezione d'attacco, dipende probabilmente dalle difficoltà nel modellare in maniera precisa l'interfaccia acciaio-calcestruzzo. Osservando la legge bond-slip in figura 10.10, si nota come al variare dello scorrimento la rigidezza varia notevolmente, passando da un valore infinito a un valore relativamente basso. Il semplificazione effettuata prendendo il valore della rigidezza secante al 50% ha probabilmente influito sulla propagazione delle tensioni all'interno delle barre.



- Figura 10.17 – Andamento delle tensioni nelle barre superiori per gli ultimi 2 incrementi di carico.

Nell'immagine di figura 10.18 è riportato invece l'andamento delle tensioni con una scala differente rispetto a quella di figura 10.16. Si nota come le trazioni maggiori sono ovviamente all'estradosso della trave. All'intradosso invece le compressioni si

concentrano, negli ultimi incrementi di carico, esclusivamente nei 3-4cm di copriferro; tale distribuzione denota un abbassamento dell'asse neutro come si era rilevato sperimentalmente grazie alle letture degli estensimetri.



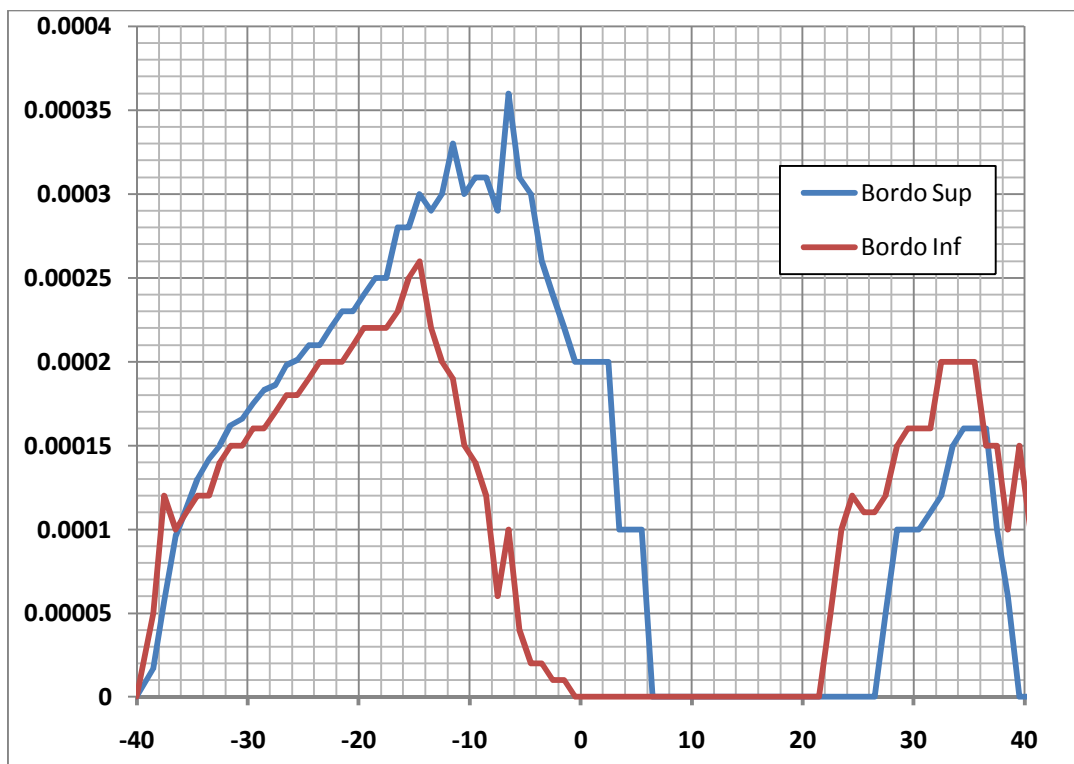
- Figura 10.18 – Distribuzione delle tensioni [stress xx].

### 10.2.3 – Andamento degli scorrimenti e delle deformazioni.

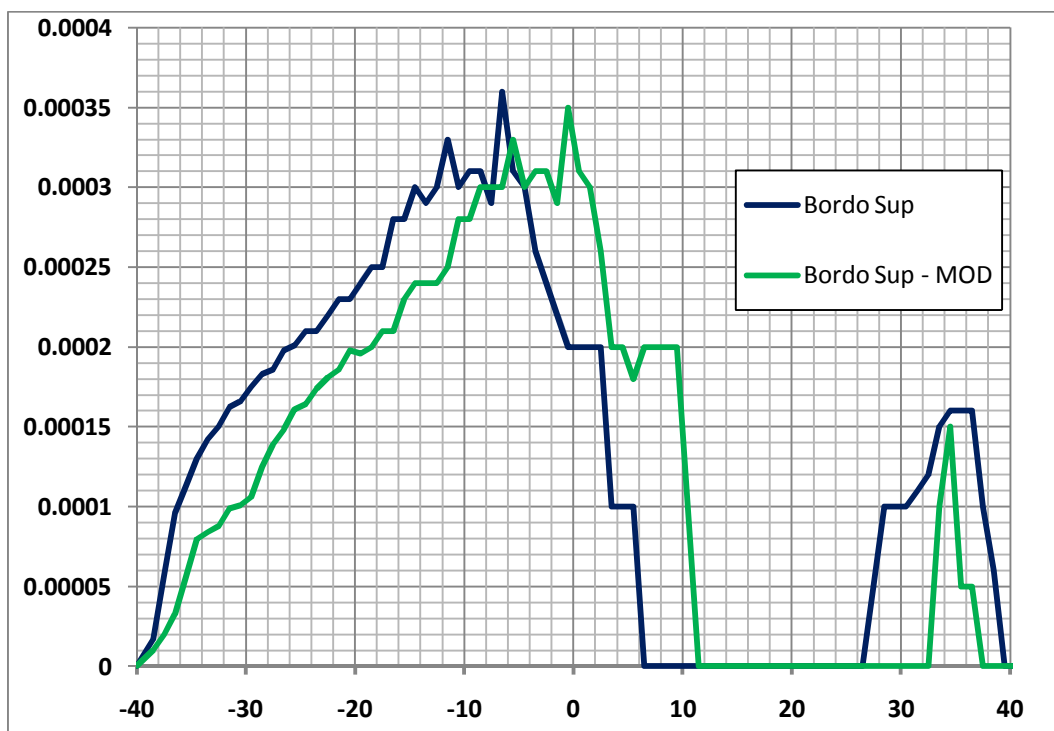
Nel diagramma di figura 10.19 sono riportati gli andamenti degli scorrimenti al bordo superiore e al bordo inferiore dell'interfaccia acciaio-calcestruzzo per la barra integrativa superiore per il modello originario (particolare di ancoraggio delle barre in figura 10.2).

Si nota innanzitutto un comportamento simile tra i due scorrimenti, con una leggera prevalenza dello scorrimento al bordo superiore dell'interfaccia. Tuttavia lo scorrimento del bordo inferiore è da ritenersi meno attendibile di quello del bordo superiore; questo perché nello strato inferiore compreso tra le due barre le semplificazioni effettuate nel modello non permettono di ricostruire il quadro tensionale e deformativo che si verifica nella realtà; tale operazione risulta invece molto più semplice per lo strato di calcestruzzo che costituisce il copriferro al di sopra della barra.





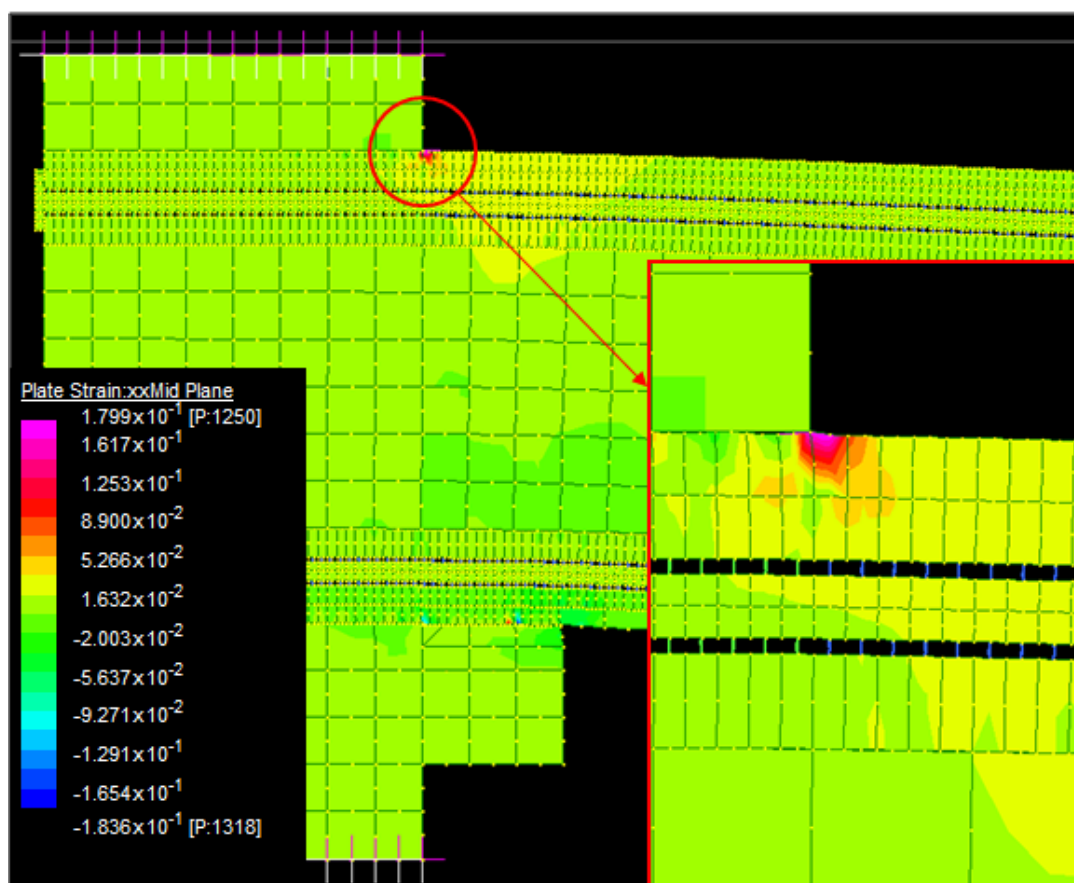
- Figura 10.19 – Andamento dello scorrimento del bordo superiore e inferiore al variare dell'ascissa per il modello originario.



- Figura 10.20 – Andamento dello scorrimento del bordo superiore al variare dell'ascissa per il modello originario e modificato.

Nel diagramma di figura 10.20, in cui è riportato il confronto tra il modello originario, con ancoraggio dovuto esclusivamente all'aderenza, e il modello modificato, con ancoraggio supportato inoltre da una piastrina d'acciaio, si nota subito un andamento diverso in corrispondenza della sezione d'estremità. Il modello senza piastrina d'ancoraggio ha fatto registrare scorrimenti elevati sin da subito mentre nel caso con la piastrina il valore degli scorrimenti per i primi 3-4cm cresce in maniera più lenta. Il comportamento del modello originario potrebbe assomigliare a ciò è avvenuto nella prima prova, infatti in tale sperimentazione i ferri risultavano piegati semplicemente a 90°, e l'elevato scorrimento che si era verificato anche nella sezione d'ancoraggio ha portato alla piegatura delle barre con conseguente espulsione del copriferro (vedi paragrafo 9.4.5). Il diagramma relativo al modello modificato, oltre ad avere scorrimenti molto piccoli nel primo tratto risulta avere un valore massimo leggermente inferiore a quello relativo al modello originario.

Gli scorrimenti, in particolare quello relativo al diagramma del modello con ancoraggio, presentano un massimo nei pressi della sezione d'attacco pilastro-trave e successivamente si azzerano prima di ricominciare a crescere; tale andamento è tipico quando si forma una fessura. Osservando l'andamento delle deformazioni nella stessa sezione, come si nota nella figura 10.21, si può notare, sin dai primi incrementi di carico, una concentrazione di deformazione molto elevata che conferma la formazione di una fessura in quella posizione.



- Figura 10.21 – Andamento delle deformazioni [strain xx].



## Bibliografia

---

- [1] Sito internet:  
[www.ape.it](http://www.ape.it), sito ufficiale della ditta APE s.p.a..
- [2] Sito internet:  
[www.dsiamerica.com/products/post-tensioning/bar-post-tensioning-system](http://www.dsiamerica.com/products/post-tensioning/bar-post-tensioning-system).
- [3] Sito internet:  
[www.strand7.com](http://www.strand7.com)
- [4] Sito internet:  
[www.setec-group.it/products/downloads/documentation5-2.html](http://www.setec-group.it/products/downloads/documentation5-2.html).
- [5] Sito internet:  
[www.setec-group.it/products/downloads/ServoAct\(I-GB\).pdf](http://www.setec-group.it/products/downloads/ServoAct(I-GB).pdf).
- [6] Sito internet:  
[www.cours.polymtl.ca/mec6405/Instruments%20Spec/Vishay\\_P3500.pdf](http://www.cours.polymtl.ca/mec6405/Instruments%20Spec/Vishay_P3500.pdf).
- [7] Bollettino tecnico Cod. B-129-IT  
*“Preparazione della superficie per l’incollaggio degli estensimetri”*  
Rev. 2 del 07/05/99.
- [8] Bollettino tecnico Cod. B-127-IT  
*“Incollaggio degli estensimetri”*  
Rev. 2 del 18/11/99.
- [9] Sito internet:  
[www.intertechnology.com/Vishay/Vishay\\_Model\\_2100\\_Signal\\_Conditioner\\_Amplifier.html](http://www.intertechnology.com/Vishay/Vishay_Model_2100_Signal_Conditioner_Amplifier.html).
- [10] Sito internet:  
[www.hbm.com/it/menu/prodotti/elttronica-e-software-di-misura/sistemi-universali-di-acquisizione-dati](http://www.hbm.com/it/menu/prodotti/elttronica-e-software-di-misura/sistemi-universali-di-acquisizione-dati).
- [11] POZZATI P.- CECCOLI C., *“Teoria e tecnica delle strutture”*, UTET; Volume II, Parte II, p. 1.3.3.
- [12] Sito internet:  
[www.apc.com/resource/include/techspec\\_index.cfm?base\\_sku=BR800I](http://www.apc.com/resource/include/techspec_index.cfm?base_sku=BR800I).
- [13] Ministero delle Infrastrutture;  
D.M. 14 gennaio 2008, *“Norme tecniche per le costruzioni”*.

